



Σχολή Εφαρμοσμένων Τεχνών και Βιώσιμου Σχεδιασμού

Περιβαλλοντικός Σχεδιασμός για την Αντιμετώπιση της
Κλιματικής Αλλαγής

Διπλωματική Εργασία

Επίδραση της αλλαγής της θερμοκρασίας στην ποιότητα
ατμόσφαιρας αστικών περιοχών και συγκεκριμένα της
Αθήνας

Αικατερίνη Ντζάθα

Επιβλέπων καθηγητής: Νικόλαος Ραψομανίκης

Πάτρα, Ιούλιος 2026

Η παρούσα εργασία αποτελεί πνευματική ιδιοκτησία του/της φοιτητή/φοιτήτριας («συγγραφέας/δημιουργός») που την εκπόνησε. Στο πλαίσιο της πολιτικής ανοικτής πρόσβασης ο συγγραφέας/δημιουργός εκχωρεί στο ΕΑΠ, μη αποκλειστική άδεια χρήσης του δικαιώματος αναπαραγωγής, προσαρμογής, δημόσιου δανεισμού, παρουσίασης στο κοινό και ψηφιακής διάχυσής τους διεθνώς, σε ηλεκτρονική μορφή και σε οποιοδήποτε μέσο, για διδακτικούς και ερευνητικούς σκοπούς, άνευ ανταλλάγματος και για όλο το χρόνο διάρκειας των δικαιωμάτων πνευματικής ιδιοκτησίας. Η ανοικτή πρόσβαση στο πλήρες κείμενο για μελέτη και ανάγνωση δεν σημαίνει καθ' οιονδήποτε τρόπο παραχώρηση δικαιωμάτων διανοητικής ιδιοκτησίας του συγγραφέα/δημιουργού ούτε επιτρέπει την αναπαραγωγή, αναδημοσίευση, αντιγραφή, αποθήκευση, πώληση, εμπορική χρήση, μετάδοση, διανομή, έκδοση, εκτέλεση, «μεταφόρτωση» (downloading), «ανάρτηση» (uploading), μετάφραση, τροποποίηση με οποιονδήποτε τρόπο, τμηματικά ή περιληπτικά της εργασίας, χωρίς τη ρητή προηγούμενη έγγραφη συναίνεση του συγγραφέα/δημιουργού. Ο συγγραφέας/δημιουργός διατηρεί το σύνολο των ηθικών και περιουσιακών του δικαιωμάτων.



Επίδραση της αλλαγής της θερμοκρασίας στην ποιότητα ατμόσφαιρας αστικών περιοχών και συγκεκριμένα της Αθήνας

Αικατερίνη Ντζάθα

Επιτροπή Επίβλεψης Διπλωματικής Εργασίας

Επιβλέπων Καθηγητής:
Νικόλαος Ραψομανίκης
ΣΕΠ, Ε.Α.Π

Συν-Επιβλέπουσα Καθηγήτρια:
Αικατερίνη Σταματελάτου
ΣΕΠ, Ε.Α.Π

Πάτρα, Ιούλιος 2026

Ευχαριστίες – Αφιέρωση

Θα ήθελα να εκφράσω τις θερμές μου ευχαριστίες στον επιβλέποντα καθηγητή μου, κ. Νικόλαο Ραψομανίκη, για την επιστημονική καθοδήγηση, τις ουσιαστικές παρατηρήσεις και τις πολύτιμες υποδείξεις του καθ' όλη τη διάρκεια εκπόνησης της παρούσας διπλωματικής εργασίας. Η συμβολή του υπήρξε καθοριστική για τη μεθοδολογική οργάνωση, την επιστημονική τεκμηρίωση και τη συνολική διαμόρφωση της εργασίας.

Θα ήθελα επίσης να ευχαριστήσω τη συνεπιβλέπουσα καθηγήτρια, κ. Αικατερίνη Σταματελάτου, για τη συμμετοχή της στην Επιτροπή Επίβλεψης και για τη συμβολή της στην ακαδημαϊκή αξιολόγηση της εργασίας.

Ιδιαίτερες ευχαριστίες οφείλω στην οικογένειά μου για τη διαρκή υποστήριξη, την υπομονή και την κατανόηση που μου προσέφερε σε όλη τη διάρκεια των σπουδών και της εκπόνησης της παρούσας εργασίας. Η παρουσία και η ενθάρρυνσή της υπήρξαν πολύτιμες, ιδιαίτερα στις πιο απαιτητικές φάσεις της ερευνητικής και συγγραφικής διαδικασίας.

Θα ήθελα ακόμη να εκφράσω μια σιωπηλή ευχαριστία σε ένα πρόσωπο που δεν βρίσκεται πλέον στη ζωή, αλλά του οποίου η παρουσία, η πίστη και η ενθάρρυνση εξακολουθούν να συνοδεύουν κάθε μου προσπάθεια. Ο Κωνσταντίνος Σκαρμούτσος παραμένει, με τον δικό του τρόπο, ένα σταθερό σημείο αναφοράς στη ζωή και στην προσωπική μου διαδρομή.

Θα ήθελα επίσης να ευχαριστήσω το προσωπικό των βιβλιοθηκών που στήριξε ουσιαστικά την έρευνά μου, προσφέροντας πρόσβαση σε βιβλιογραφικό υλικό, καθώς και πρόθυμη βοήθεια στην αναζήτηση και αξιοποίηση των πηγών. Ειδικότερα, ευχαριστώ το προσωπικό της Κεντρικής Βιβλιοθήκης του Αριστοτελείου Πανεπιστημίου Θεσσαλονίκης και του Παραρτήματος της Κεντρικής Βιβλιοθήκης του Πανεπιστημίου Θεσσαλίας στη Λαμία.

Περίληψη

Η παρούσα διπλωματική εργασία διερευνά τη σχέση μεταξύ της θερμοκρασίας και της ποιότητας του αέρα στο λεκανοπέδιο της Αθήνας κατά την περίοδο 2016–2024. Ειδικότερα, εξετάζεται κατά πόσο η ημερήσια μέση θερμοκρασία και οι μεταβολές της μεταξύ διαδοχικών ημερών συνδέονται με τις ημερήσιες συγκεντρώσεις και τις αντίστοιχες ημερήσιες μεταβολές των ατμοσφαιρικών ρύπων NO , NO_2 , O_3 , PM_{10} και SO_2 . Για την ανάλυση χρησιμοποιήθηκαν δεδομένα από τους σταθμούς παρακολούθησης της ατμοσφαιρικής ρύπανσης Αριστοτέλους, Πατησίων, Ελευσίνας, Λυκόβρυσης και Θρακομακεδόνων, οι οποίοι αντιπροσωπεύουν διαφορετικούς χωρικούς και λειτουργικούς τύπους περιβάλλοντος, όπως περιοχές αστικού υποβάθρου, κυκλοφοριακά επιβαρυμένες, προαστιακές, περιαστικές και βιομηχανικά επηρεασμένες περιοχές. Τα δεδομένα ατμοσφαιρικής ρύπανσης συνδυάστηκαν με ημερήσιες θερμοκρασιακές παρατηρήσεις από μετεωρολογικούς σταθμούς της Αττικής.

Η μεθοδολογία περιλάμβανε τον καθαρισμό και την ομογενοποίηση των χρονοσειρών, τον υπολογισμό ημερήσιων μέσων τιμών, την εκτίμηση των διαφορών μεταξύ διαδοχικών ημερών και την εποχική ταξινόμηση των παρατηρήσεων. Εφαρμόστηκαν μέθοδοι περιγραφικής στατιστικής, ανάλυσης συσχέτισης και απλής γραμμικής παλινδρόμησης. Η ανάλυση πραγματοποιήθηκε τόσο στις ημερήσιες μέσες τιμές της θερμοκρασίας και των συγκεντρώσεων των ρύπων όσο και στις αντίστοιχες ημερήσιες μεταβολές τους, με σκοπό τη διάκριση των ευρύτερων εποχικών σχέσεων από τις βραχυχρόνιες συν-μεταβολές.

Τα αποτελέσματα έδειξαν ότι η σχέση μεταξύ θερμοκρασίας και ατμοσφαιρικής ρύπανσης διαφοροποιείται ανάλογα με τον ρύπο, την εποχή και τα χαρακτηριστικά κάθε σταθμού. Το O_3 παρουσίασε τις σαφέστερες θετικές σχέσεις με τη θερμοκρασία, εύρημα συμβατό με τον σημαντικό ρόλο της φωτοχημικής δραστηριότητας στη διαμόρφωση των συγκεντρώσεών του. Τα NO και NO_2 εμφάνισαν συχνότερα αρνητικές σχέσεις, ιδιαίτερα κατά τις ψυχρότερες περιόδους του έτους, ενώ τα PM_{10} παρουσίασαν κυρίως θετικές, αλλά χωρικά και εποχικά διαφοροποιημένες, συσχετίσεις. Το SO_2 εμφάνισε γενικά ασθενέστερες και λιγότερο σταθερές σχέσεις. Οι συσχετίσεις μεταξύ των ημερήσιων μεταβολών ήταν κατά κανόνα ασθενέστερες από εκείνες που βασίζονταν στις ημερήσιες μέσες τιμές, γεγονός που υποδηλώνει ότι οι βραχυχρόνιες μεταβολές της θερμοκρασίας συνδέονται μόνο με περιορισμένο μέρος της αντίστοιχης μεταβλητότητας των συγκεντρώσεων των ρύπων.

Τα ευρήματα καταδεικνύουν ότι η θερμοκρασία αποτελεί σημαντικό, αλλά όχι αποκλειστικό, παράγοντα που συνδέεται με τη διαμόρφωση της ποιότητας του αέρα. Η σχέση μεταξύ θερμοκρασίας και συγκεντρώσεων των ρύπων επηρεάζεται επίσης από τις τοπικές εκπομπές, τις φωτοχημικές διεργασίες και τις συνθήκες ατμοσφαιρικής διασποράς. Κατά συνέπεια, αναδεικνύεται η ανάγκη χωρικά και εποχικά διαφοροποιημένης ερμηνείας της σχέσης μεταξύ θερμοκρασίας και ατμοσφαιρικής ρύπανσης σε ένα σύνθετο μεσογειακό αστικό περιβάλλον.

Λέξεις-κλειδιά: Ατμοσφαιρική ρύπανση, ποιότητα του αέρα, θερμοκρασία, ημερήσια μεταβολή θερμοκρασίας, εποχικότητα, Αθήνα

The Impact of Temperature Change on Air Quality in Urban Areas: The Case of Athens

Aikaterini Ntzatha

Abstract

This master's thesis investigates the relationship between temperature and air quality in the Athens Basin during the period 2016–2024. More specifically, it examines whether daily mean temperature and changes between consecutive days are associated with the daily concentrations and corresponding daily changes of the atmospheric pollutants NO, NO₂, O₃, PM₁₀, and SO₂. The analysis was based on data from the Aristotelous, Patision, Elefsina, Lykovrysi, and Thrakomakedones air-quality monitoring stations, which represent different spatial and functional environmental settings, including urban-background, traffic-affected, suburban, peri-urban, and industrially influenced areas. Air-pollution data were combined with daily temperature observations from meteorological stations located in Attica.

The methodology included the cleaning and homogenisation of the time series, the calculation of daily mean values, the estimation of differences between consecutive days, and the seasonal classification of the observations. Descriptive statistical methods, correlation analysis, and simple linear regression were applied. The analysis was conducted both on daily mean temperature and pollutant concentration values and on their corresponding daily changes, with the aim of distinguishing broader seasonal relationships from short-term co-variations.

The results showed that the relationship between temperature and air pollution varies according to the pollutant, the season, and the characteristics of each monitoring station. O₃ displayed the clearest positive relationships with temperature, a finding consistent with the important role of photochemical activity in shaping its concentrations. NO and NO₂ more frequently exhibited negative relationships, particularly during the colder periods of the year, whereas PM₁₀ showed predominantly positive, but spatially and seasonally differentiated, correlations. SO₂ generally displayed weaker and less consistent relationships. Correlations between daily changes were generally weaker than those based on daily mean values, suggesting that short-term temperature changes are associated with only a limited proportion of the corresponding variability in pollutant concentrations.

The findings indicate that temperature is an important, but not exclusive, factor associated with variations in air quality. The relationship between temperature and pollutant concentrations is also influenced by local emissions, photochemical processes, and atmospheric dispersion conditions. The study therefore highlights the need for a spatially and seasonally differentiated interpretation of the relationship between temperature and air pollution in a complex Mediterranean urban environment.

Keywords: Air pollution, air quality, temperature, daily temperature change, seasonality, Athens

Περιεχόμενα

Περίληψη.....	v
Abstract.....	vi
Περιεχόμενα.....	vii
Κατάλογος Σχημάτων.....	xi
Κατάλογος Πινάκων.....	xvi
Συντομογραφίες, Ακρωνύμια και Σύμβολα.....	xviii
Τα 5 σημαντικότερα σημεία της εργασίας.....	xix
Συνεισφορά Εργασίας.....	xx
1. Εισαγωγή.....	1
1.1 Αντικείμενο της εργασίας.....	1
1.2 Σκοπός και στόχοι.....	2
1.3 Ερευνητικά ερωτήματα.....	3
1.4 Συνεισφορά της εργασίας.....	4
1.5 Δομή της εργασίας.....	5
2. Βιβλιογραφική Επισκόπηση.....	6
2.1 Ορισμός ποιότητας αέρα και βασικοί δείκτες.....	6
2.1.1 Βασικοί ατμοσφαιρικοί ρύποι και δείκτες ποιότητας του αέρα.....	7
2.1.2 Ιδιαιτερότητες της ατμόσφαιρας των αστικών περιοχών.....	9
2.1.3 Διαφορές μεταξύ σταθμών κυκλοφοριακής επιβάρυνσης, αστικού υποβάθρου, προαστιακού, περιαστικού και βιομηχανικά επηρεασμένου χαρακτήρα 11	
2.2 Παράγοντες που επηρεάζουν τη θερμοκρασία στο αστικό περιβάλλον.....	12
2.2.1 Αστική γεωμετρία και μορφολογία του δομημένου περιβάλλοντος. .	13
2.2.2 Βλάστηση και δομικά υλικά.....	14
2.2.3 Κυκλοφορία, ενεργειακή κατανάλωση και ανθρωπογενής θερμότητα 15	
2.2.4 Αστική θερμική νησίδα.....	17
2.2.5 Κλιματική αλλαγή και μεταβολή των θερμοκρασιακών συνθηκών.	19
2.3 Μηχανισμοί επίδρασης της θερμοκρασίας στους ατμοσφαιρικούς ρύπους	21
2.3.1 Επίδραση της θερμοκρασίας στις φωτοχημικές αντιδράσεις.....	22
2.3.2 Επίδραση της θερμοκρασίας στην ατμοσφαιρική διασπορά.....	25
2.3.3 Επίδραση της θερμοκρασίας στις εκπομπές ατμοσφαιρικών ρύπων. 27	
2.3.4 Επίδραση της θερμοκρασίας στον σχηματισμό δευτερογενών αερολυμάτων.....	30
2.4 Αναμενόμενες σχέσεις της θερμοκρασίας με τους εξεταζόμενους ατμοσφαιρικούς ρύπους.....	32
2.4.1 Αναμενόμενη σχέση της θερμοκρασίας με το NO.....	34
2.4.2 Αναμενόμενη σχέση της θερμοκρασίας με το NO ₂	35
2.4.3 Αναμενόμενη σχέση της θερμοκρασίας με το O ₃	36
2.4.4 Αναμενόμενη σχέση της θερμοκρασίας με τα PM ₁₀	38
2.4.5 Αναμενόμενη σχέση της θερμοκρασίας με το SO ₂	40
2.5 Προηγούμενες μελέτες.....	42
2.5.1 Μελέτες στην Ελλάδα και στην Αθήνα.....	44

2.5.2 Διεθνείς μελέτες.....	48
2.6 Ερευνητικό κενό και σύνδεση με την παρούσα εργασία.....	51
3. Μεθοδολογία.....	54
3.1 Μεθοδολογικός σχεδιασμός της έρευνας.....	54
3.2 Περιοχή μελέτης και σταθμοί ατμοσφαιρικής ρύπανσης.....	55
3.2.1 Η Αθήνα ως περιοχή μελέτης.....	55
3.2.2 Επιλογή και χαρακτηριστικά των σταθμών ατμοσφαιρικής ρύπανσης	56
3.3 Πηγές, χαρακτηριστικά και χρονική περίοδος δεδομένων.....	58
3.3.1 Δεδομένα ατμοσφαιρικής ρύπανσης από το ΕΔΠΑΡ.....	58
3.3.2 Μετεωρολογικά δεδομένα από την ΕΜΥ.....	59
3.3.3 Επιλογή μεταβλητών και χρονική περίοδος της μελέτης.....	60
3.4 Αντιστοίχιση σταθμών ατμοσφαιρικής ρύπανσης και μετεωρολογικών σταθμών.....	62
3.4.1 Αναγκαιότητα και κριτήρια αντιστοίχισης.....	62
3.4.2 Τελική αντιστοίχιση σταθμών και περιορισμοί.....	63
3.5 Προεπεξεργασία και οργάνωση των δεδομένων.....	66
3.5.1 Καθαρισμός και ομογενοποίηση δεδομένων.....	66
3.5.2 Υπολογισμός ημερήσιων μέσων τιμών.....	67
3.5.3 Υπολογισμός μεταβολών μεταξύ διαδοχικών ημερών.....	68
3.5.4 Εποχική ταξινόμηση των παρατηρήσεων.....	70
3.5.5 Δημιουργία τελικών αναλυτικών συνόλων δεδομένων.....	71
3.6 Στατιστικές μέθοδοι ανάλυσης.....	73
3.6.1 Περιγραφική στατιστική.....	73
3.6.2 Ανάλυση συσχέτισης.....	74
3.6.3 Απλή γραμμική παλινδρόμηση.....	75
3.6.4 Εποχική και χωρική σύγκριση αποτελεσμάτων.....	77
3.6.5 Ερμηνεία και όρια των στατιστικών αποτελεσμάτων.....	78
3.7 Γραφικές απεικονίσεις.....	79
3.8 Περιορισμοί της μεθοδολογίας.....	81
4. Αποτελέσματα.....	83
4.1 Πληρότητα και ποιοτικός έλεγχος δεδομένων.....	83
4.2 Περιγραφική στατιστική θερμοκρασίας και ρύπων.....	87
4.2.1 Περιγραφικά χαρακτηριστικά της θερμοκρασίας.....	87
4.2.2 Περιγραφικά χαρακτηριστικά των ατμοσφαιρικών ρύπων.....	88
4.3 Διαχρονική μεταβολή της θερμοκρασίας και των ατμοσφαιρικών ρύπων.....	93
4.3.1 Διαχρονική μεταβολή της θερμοκρασίας.....	94
4.3.2 Διαχρονική μεταβολή των ατμοσφαιρικών ρύπων.....	96
4.4 Εποχική μεταβολή της θερμοκρασίας και των ατμοσφαιρικών ρύπων.....	102
4.4.1 Εποχική μεταβολή της θερμοκρασίας.....	102
4.4.2 Εποχική μεταβολή των ατμοσφαιρικών ρύπων.....	104
4.5 Σχέση θερμοκρασίας και μονοξειδίου του αζώτου (NO).....	110
4.5.1 Σχέση ημερήσιας μέσης θερμοκρασίας και ημερήσιας συγκέντρωσης NO ανά εποχή και σταθμό.....	111
4.5.2 Σχέση ημερήσιας μεταβολής της θερμοκρασίας και ημερήσιας μεταβολής της συγκέντρωσης NO ανά εποχή και σταθμό.....	116

4.5.3 Κατανομή της ημερήσιας μεταβολής της συγκέντρωσης NO ανά κατηγορία ημερήσιας μεταβολής της θερμοκρασίας.....	120
4.5.4 Συγκριτική παρουσίαση των αποτελεσμάτων για το NO.....	125
4.6 Σχέση θερμοκρασίας και διοξειδίου του αζώτου (NO ₂).....	130
4.6.1 Σχέση ημερήσιας μέσης θερμοκρασίας και ημερήσιας συγκέντρωσης NO ₂ ανά εποχή και σταθμό.....	130
4.6.2 Σχέση ημερήσιας μεταβολής της θερμοκρασίας και ημερήσιας μεταβολής της συγκέντρωσης NO ₂ ανά εποχή και σταθμό.....	137
4.6.3 Κατανομή της ημερήσιας μεταβολής της συγκέντρωσης NO ₂ ανά κατηγορία ημερήσιας μεταβολής της θερμοκρασίας.....	142
4.6.4 Συγκριτική παρουσίαση των αποτελεσμάτων για το NO ₂	147
4.7 Σχέση θερμοκρασίας και όζοντος (O ₃).....	152
4.7.1 Σχέση ημερήσιας μέσης θερμοκρασίας και ημερήσιας συγκέντρωσης O ₃ ανά εποχή και σταθμό.....	152
4.7.2 Σχέση ημερήσιας μεταβολής της θερμοκρασίας και ημερήσιας μεταβολής της συγκέντρωσης O ₃ ανά εποχή και σταθμό.....	157
4.7.3 Κατανομή της ημερήσιας μεταβολής της συγκέντρωσης O ₃ ανά κατηγορία ημερήσιας μεταβολής της θερμοκρασίας.....	162
4.7.4 Συγκριτική παρουσίαση των αποτελεσμάτων για το O ₃	167
4.8 Σχέση θερμοκρασίας και αιωρούμενων σωματιδίων PM ₁₀	171
4.8.1 Σχέση ημερήσιας μέσης θερμοκρασίας και ημερήσιας συγκέντρωσης PM ₁₀ ανά εποχή και σταθμό.....	172
4.8.2 Σχέση ημερήσιας μεταβολής της θερμοκρασίας και ημερήσιας μεταβολής της συγκέντρωσης PM ₁₀ ανά εποχή και σταθμό.....	176
4.8.3 Κατανομή της ημερήσιας μεταβολής της συγκέντρωσης PM ₁₀ ανά κατηγορία ημερήσιας μεταβολής της θερμοκρασίας.....	180
4.8.4 Συγκριτική παρουσίαση των αποτελεσμάτων για τα PM ₁₀	185
4.9 Σχέση θερμοκρασίας και διοξειδίου του θείου (SO ₂).....	190
4.9.1 Σχέση ημερήσιας μέσης θερμοκρασίας και ημερήσιας συγκέντρωσης SO ₂ ανά εποχή και σταθμό.....	191
4.9.2 Σχέση ημερήσιας μεταβολής της θερμοκρασίας και ημερήσιας μεταβολής της συγκέντρωσης SO ₂ ανά εποχή και σταθμό.....	195
4.9.3 Κατανομή της ημερήσιας μεταβολής της συγκέντρωσης SO ₂ ανά κατηγορία ημερήσιας μεταβολής της θερμοκρασίας.....	199
4.9.4 Συγκριτική παρουσίαση των αποτελεσμάτων για το SO ₂	203
4.10 Συγκριτική σύνθεση των αποτελεσμάτων για τη σχέση θερμοκρασίας και ατμοσφαιρικών ρύπων.....	207
4.11 Σύνοψη βασικών ευρημάτων.....	211
5. Συμπεράσματα.....	214
5.1 Συνοπτική αποτίμηση της έρευνας.....	214
5.2 Απάντηση στα ερευνητικά ερωτήματα.....	215
5.2.1 Σχέση ημερήσιας μέσης θερμοκρασίας και συγκεντρώσεων των ατμοσφαιρικών ρύπων.....	216
5.2.2 Σχέση ημερήσιων μεταβολών θερμοκρασίας και ατμοσφαιρικών ρύπων.....	217
5.2.3 Εποχική διαφοροποίηση των σχέσεων.....	219

5.2.4 Χωρική διαφοροποίηση των σχέσεων και χαρακτήρας των σταθμών	220
5.3 Σύνθεση των βασικών συμπερασμάτων ανά ατμοσφαιρικό ρύπο.....	222
5.3.1 Μονοξείδιο του αζώτου (NO).....	222
5.3.2 Διοξείδιο του αζώτου (NO ₂).....	223
5.3.3 Τροποσφαιρικό όζον (O ₃).....	224
5.3.4 Αιωρούμενα σωματίδια (PM ₁₀).....	225
5.3.5 Διοξείδιο του θείου (SO ₂).....	226
5.4 Επιστημονική συμβολή και πρακτική σημασία.....	228
5.5 Περιορισμοί της έρευνας.....	230
5.6 Προτάσεις για μελλοντική έρευνα.....	231
5.7 Τελικό συμπέρασμα.....	233
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ.....	235

Κατάλογος Σχημάτων

Σχήμα 2.1. Σχηματική αναπαράσταση της αστικής θερμικής νησίδας και της χωρικής μεταβολής της θερμοκρασίας σε διαφορετικούς τύπους χρήσεων γης.....	18
Σχήμα 2.2. Σχηματική αναπαράσταση θερμοκρασιακής αναστροφής και περιορισμού της κατακόρυφης διασποράς των ατμοσφαιρικών ρύπων.	26
Σχήμα 4.1. Διαχρονική μεταβολή της ετήσιας μέσης θερμοκρασίας στους μετεωρολογικούς σταθμούς Ελευσίνας, Ελληνικού και Τατοΐου κατά την περίοδο 2016–2024.....	95
Σχήμα 4.2. Διαχρονική μεταβολή της ετήσιας μέσης συγκέντρωσης NO στους σταθμούς Αριστοτέλους, Ελευσίνας, Θρακομακεδόνων, Λυκόβρυσης και Πατησίων κατά την περίοδο 2016–2024.....	96
Σχήμα 4.3. Διαχρονική μεταβολή της ετήσιας μέσης συγκέντρωσης NO ₂ στους σταθμούς Αριστοτέλους, Ελευσίνας, Θρακομακεδόνων, Λυκόβρυσης και Πατησίων κατά την περίοδο 2016–2024.....	97
Σχήμα 4.4. Διαχρονική μεταβολή της ετήσιας μέσης συγκέντρωσης O ₃ στους σταθμούς Ελευσίνας, Θρακομακεδόνων, Λυκόβρυσης και Πατησίων κατά την περίοδο 2016–2024.....	98
Σχήμα 4.5. Διαχρονική μεταβολή της ετήσιας μέσης συγκέντρωσης SO ₂ στους σταθμούς Αριστοτέλους, Ελευσίνας και Πατησίων κατά την περίοδο 2016–2024.....	99
Σχήμα 4.6. Διαχρονική μεταβολή της ετήσιας μέσης συγκέντρωσης PM ₁₀ στους σταθμούς Αριστοτέλους, Ελευσίνας, Θρακομακεδόνων και Λυκόβρυσης κατά την περίοδο 2016–2024.....	100
Σχήμα 4.7. Εποχική κατανομή της ημερήσιας μέσης θερμοκρασίας στους μετεωρολογικούς σταθμούς Ελευσίνας, Ελληνικού και Τατοΐου κατά την περίοδο 2016–2024.....	103
Σχήμα 4.8. Εποχική κατανομή της ημερήσιας μέσης συγκέντρωσης NO στους σταθμούς Αριστοτέλους, Ελευσίνας, Θρακομακεδόνων, Λυκόβρυσης και Πατησίων κατά την περίοδο 2016–2024.....	105
Σχήμα 4.9. Εποχική κατανομή της ημερήσιας μέσης συγκέντρωσης NO ₂ στους σταθμούς Αριστοτέλους, Ελευσίνας, Θρακομακεδόνων, Λυκόβρυσης και Πατησίων κατά την περίοδο 2016–2024.....	106
Σχήμα 4.10. Εποχική κατανομή της ημερήσιας μέσης συγκέντρωσης O ₃ στους σταθμούς Ελευσίνας, Θρακομακεδόνων, Λυκόβρυσης και Πατησίων κατά την περίοδο 2016–2024.....	107
Σχήμα 4.11. Εποχική κατανομή της ημερήσιας μέσης συγκέντρωσης SO ₂ στους σταθμούς Αριστοτέλους, Ελευσίνας και Πατησίων κατά την περίοδο 2016–2024.....	108
Σχήμα 4.12. Εποχική κατανομή της ημερήσιας μέσης συγκέντρωσης PM ₁₀ στους σταθμούς Αριστοτέλους, Ελευσίνας, Θρακομακεδόνων και Λυκόβρυσης κατά την περίοδο 2016–2024.....	109
Σχήμα 4.13. Σχέση μεταξύ της ημερήσιας μέσης θερμοκρασίας και της ημερήσιας μέσης συγκέντρωσης NO ανά εποχή στον σταθμό Αριστοτέλους κατά την περίοδο 2016–2024.	112
Σχήμα 4.14. Σχέση μεταξύ της ημερήσιας μέσης θερμοκρασίας και της ημερήσιας μέσης συγκέντρωσης NO ανά εποχή στον σταθμό Ελευσίνας κατά την περίοδο 2016–2024.....	112
Σχήμα 4.15. Σχέση μεταξύ της ημερήσιας μέσης θερμοκρασίας και της ημερήσιας μέσης συγκέντρωσης NO ανά εποχή στον σταθμό Θρακομακεδόνων κατά την περίοδο 2016–2024.....	113
Σχήμα 4.16. Σχέση μεταξύ της ημερήσιας μέσης θερμοκρασίας και της ημερήσιας μέσης συγκέντρωσης NO ανά εποχή στον σταθμό Λυκόβρυσης κατά την περίοδο 2016–2024.....	113

Σχήμα 4.17. Σχέση μεταξύ της ημερήσιας μέσης θερμοκρασίας και της ημερήσιας μέσης συγκέντρωσης NO ανά εποχή στον σταθμό Πατησίων κατά την περίοδο 2016–2024.....	114
Σχήμα 4.18. Σχέση μεταξύ της ημερήσιας μεταβολής της μέσης θερμοκρασίας και της ημερήσιας μεταβολής της συγκέντρωσης NO ανά εποχή στον σταθμό Αριστοτέλους κατά την περίοδο 2016–2024.....	116
Σχήμα 4.19. Σχέση μεταξύ της ημερήσιας μεταβολής της μέσης θερμοκρασίας και της ημερήσιας μεταβολής της συγκέντρωσης NO ανά εποχή στον σταθμό Ελευσίνας κατά την περίοδο 2016–2024.....	117
Σχήμα 4.20. Σχέση μεταξύ της ημερήσιας μεταβολής της μέσης θερμοκρασίας και της ημερήσιας μεταβολής της συγκέντρωσης NO ανά εποχή στον σταθμό Θρακομακεδόνων κατά την περίοδο 2016–2024.....	117
Σχήμα 4.21. Σχέση μεταξύ της ημερήσιας μεταβολής της μέσης θερμοκρασίας και της ημερήσιας μεταβολής της συγκέντρωσης NO ανά εποχή στον σταθμό Λυκόβρυσης κατά την περίοδο 2016–2024.....	118
Σχήμα 4.22. Σχέση μεταξύ της ημερήσιας μεταβολής της μέσης θερμοκρασίας και της ημερήσιας μεταβολής της συγκέντρωσης NO ανά εποχή στον σταθμό Πατησίων κατά την περίοδο 2016–2024.....	118
Σχήμα 4.23. Κατανομή της ημερήσιας μεταβολής της συγκέντρωσης NO ανά κατηγορία ημερήσιας μεταβολής της θερμοκρασίας και εποχή στον σταθμό Αριστοτέλους κατά την περίοδο 2016–2024.....	121
Σχήμα 4.24. Κατανομή της ημερήσιας μεταβολής της συγκέντρωσης NO ανά κατηγορία ημερήσιας μεταβολής της θερμοκρασίας και εποχή στον σταθμό Ελευσίνας κατά την περίοδο 2016–2024.....	122
Σχήμα 4.25. Κατανομή της ημερήσιας μεταβολής της συγκέντρωσης NO ανά κατηγορία ημερήσιας μεταβολής της θερμοκρασίας και εποχή στον σταθμό Θρακομακεδόνων κατά την περίοδο 2016–2024.....	122
Σχήμα 4.26. Κατανομή της ημερήσιας μεταβολής της συγκέντρωσης NO ανά κατηγορία ημερήσιας μεταβολής της θερμοκρασίας και εποχή στον σταθμό Λυκόβρυσης κατά την περίοδο 2016–2024.....	123
Σχήμα 4.27. Κατανομή της ημερήσιας μεταβολής της συγκέντρωσης NO ανά κατηγορία ημερήσιας μεταβολής της θερμοκρασίας και εποχή στον σταθμό Πατησίων κατά την περίοδο 2016–2024.....	123
Σχήμα 4.28. Σχέση μεταξύ της ημερήσιας μέσης θερμοκρασίας και της ημερήσιας μέσης συγκέντρωσης NO ₂ ανά εποχή στον σταθμό Αριστοτέλους κατά την περίοδο 2016–2024.....	131
Σχήμα 4.29. Σχέση μεταξύ της ημερήσιας μέσης θερμοκρασίας και της ημερήσιας μέσης συγκέντρωσης NO ₂ ανά εποχή στον σταθμό Ελευσίνας κατά την περίοδο 2016–2024.....	132
Σχήμα 4.30. Σχέση μεταξύ της ημερήσιας μέσης θερμοκρασίας και της ημερήσιας μέσης συγκέντρωσης NO ₂ ανά εποχή στον σταθμό Θρακομακεδόνων κατά την περίοδο 2016–2024.....	132
Σχήμα 4.31. Σχέση μεταξύ της ημερήσιας μέσης θερμοκρασίας και της ημερήσιας μέσης συγκέντρωσης NO ₂ ανά εποχή στον σταθμό Λυκόβρυσης κατά την περίοδο 2016–2024.....	133
Σχήμα 4.32. Σχέση μεταξύ της ημερήσιας μέσης θερμοκρασίας και της ημερήσιας μέσης συγκέντρωσης NO ₂ ανά εποχή στον σταθμό Πατησίων κατά την περίοδο 2016–2024.....	133
Σχήμα 4.33. Σχέση μεταξύ της ημερήσιας μεταβολής της μέσης θερμοκρασίας και της ημερήσιας μεταβολής της συγκέντρωσης NO ₂ ανά εποχή στον σταθμό Αριστοτέλους κατά την περίοδο 2016–2024.....	137

Σχήμα 4.34. Σχέση μεταξύ της ημερήσιας μεταβολής της μέσης θερμοκρασίας και της ημερήσιας μεταβολής της συγκέντρωσης NO ₂ ανά εποχή στον σταθμό Ελευσίνας κατά την περίοδο 2016–2024.....	137
Σχήμα 4.35. Σχέση μεταξύ της ημερήσιας μεταβολής της μέσης θερμοκρασίας και της ημερήσιας μεταβολής της συγκέντρωσης NO ₂ ανά εποχή στον σταθμό Θρακομακεδόνων κατά την περίοδο 2016–2024.....	138
Σχήμα 4.36. Σχέση μεταξύ της ημερήσιας μεταβολής της μέσης θερμοκρασίας και της ημερήσιας μεταβολής της συγκέντρωσης NO ₂ ανά εποχή στον σταθμό Λυκόβρυσης κατά την περίοδο 2016–2024.....	138
Σχήμα 4.37. Σχέση μεταξύ της ημερήσιας μεταβολής της μέσης θερμοκρασίας και της ημερήσιας μεταβολής της συγκέντρωσης NO ₂ ανά εποχή στον σταθμό Πατησίων κατά την περίοδο 2016–2024.....	139
Σχήμα 4.38. Κατανομή της ημερήσιας μεταβολής της συγκέντρωσης NO ₂ ανά κατηγορία ημερήσιας μεταβολής της μέσης θερμοκρασίας και εποχή στον σταθμό Αριστοτέλους κατά την περίοδο 2016–2024.....	142
Σχήμα 4.39. Κατανομή της ημερήσιας μεταβολής της συγκέντρωσης NO ₂ ανά κατηγορία ημερήσιας μεταβολής της μέσης θερμοκρασίας και εποχή στον σταθμό Ελευσίνας κατά την περίοδο 2016–2024.....	142
Σχήμα 4.40. Κατανομή της ημερήσιας μεταβολής της συγκέντρωσης NO ₂ ανά κατηγορία ημερήσιας μεταβολής της μέσης θερμοκρασίας και εποχή στον σταθμό Θρακομακεδόνων κατά την περίοδο 2016–2024.....	143
Σχήμα 4.41. Κατανομή της ημερήσιας μεταβολής της συγκέντρωσης NO ₂ ανά κατηγορία ημερήσιας μεταβολής της μέσης θερμοκρασίας και εποχή στον σταθμό Λυκόβρυσης κατά την περίοδο 2016–2024.....	143
Σχήμα 4.42. Κατανομή της ημερήσιας μεταβολής της συγκέντρωσης NO ₂ ανά κατηγορία ημερήσιας μεταβολής της μέσης θερμοκρασίας και εποχή στον σταθμό Πατησίων κατά την περίοδο 2016–2024.....	144
Σχήμα 4.43. Σχέση μεταξύ της ημερήσιας μέσης θερμοκρασίας και της ημερήσιας μέσης συγκέντρωσης O ₃ ανά εποχή στον σταθμό Ελευσίνας κατά την περίοδο 2016–2024.....	152
Σχήμα 4.44. Σχέση μεταξύ της ημερήσιας μέσης θερμοκρασίας και της ημερήσιας μέσης συγκέντρωσης O ₃ ανά εποχή στον σταθμό Θρακομακεδόνων κατά την περίοδο 2016–2024.....	153
Σχήμα 4.45. Σχέση μεταξύ της ημερήσιας μέσης θερμοκρασίας και της ημερήσιας μέσης συγκέντρωσης O ₃ ανά εποχή στον σταθμό Λυκόβρυσης κατά την περίοδο 2016–2024.....	153
Σχήμα 4.46. Σχέση μεταξύ της ημερήσιας μέσης θερμοκρασίας και της ημερήσιας μέσης συγκέντρωσης O ₃ ανά εποχή στον σταθμό Πατησίων κατά την περίοδο 2016–2024.....	154
Σχήμα 4.47. Σχέση μεταξύ της ημερήσιας μεταβολής της μέσης θερμοκρασίας και της ημερήσιας μεταβολής της συγκέντρωσης O ₃ ανά εποχή στον σταθμό Ελευσίνας κατά την περίοδο 2016–2024.....	157
Σχήμα 4.48. Σχέση μεταξύ της ημερήσιας μεταβολής της μέσης θερμοκρασίας και της ημερήσιας μεταβολής της συγκέντρωσης O ₃ ανά εποχή στον σταθμό Θρακομακεδόνων κατά την περίοδο 2016–2024.....	158
Σχήμα 4.49. Σχέση μεταξύ της ημερήσιας μεταβολής της μέσης θερμοκρασίας και της ημερήσιας μεταβολής της συγκέντρωσης O ₃ ανά εποχή στον σταθμό Λυκόβρυσης κατά την περίοδο 2016–2024.....	158
Σχήμα 4.50. Σχέση μεταξύ της ημερήσιας μεταβολής της μέσης θερμοκρασίας και της ημερήσιας μεταβολής της συγκέντρωσης O ₃ ανά εποχή στον σταθμό Πατησίων κατά την περίοδο 2016–2024.....	159

Σχήμα 4.51. Κατανομή της ημερήσιας μεταβολής της συγκέντρωσης O_3 ανά κατηγορία ημερήσιας μεταβολής της μέσης θερμοκρασίας και εποχή στον σταθμό Ελευσίνας κατά την περίοδο 2016–2024.....	162
Σχήμα 4.52. Κατανομή της ημερήσιας μεταβολής της συγκέντρωσης O_3 ανά κατηγορία ημερήσιας μεταβολής της μέσης θερμοκρασίας και εποχή στον σταθμό Θρακομακεδόνων κατά την περίοδο 2016–2024.....	163
Σχήμα 4.53. Κατανομή της ημερήσιας μεταβολής της συγκέντρωσης O_3 ανά κατηγορία ημερήσιας μεταβολής της μέσης θερμοκρασίας και εποχή στον σταθμό Λυκόβρυσης κατά την περίοδο 2016–2024.....	163
Σχήμα 4.54. Κατανομή της ημερήσιας μεταβολής της συγκέντρωσης O_3 ανά κατηγορία ημερήσιας μεταβολής της μέσης θερμοκρασίας και εποχή στον σταθμό Πατησίων κατά την περίοδο 2016–2024.....	164
Σχήμα 4.55. Σχέση μεταξύ της ημερήσιας μέσης θερμοκρασίας και της ημερήσιας μέσης συγκέντρωσης PM_{10} ανά εποχή στον σταθμό Αριστοτέλους κατά την περίοδο 2016–2024.....	171
Σχήμα 4.56. Σχέση μεταξύ της ημερήσιας μέσης θερμοκρασίας και της ημερήσιας μέσης συγκέντρωσης PM_{10} ανά εποχή στον σταθμό Ελευσίνας κατά την περίοδο 2016–2024.....	172
Σχήμα 4.57. Σχέση μεταξύ της ημερήσιας μέσης θερμοκρασίας και της ημερήσιας μέσης συγκέντρωσης PM_{10} ανά εποχή στον σταθμό Θρακομακεδόνων κατά την περίοδο 2016–2024.....	172
Σχήμα 4.58. Σχέση μεταξύ της ημερήσιας μέσης θερμοκρασίας και της ημερήσιας μέσης συγκέντρωσης PM_{10} ανά εποχή στον σταθμό Λυκόβρυσης κατά την περίοδο 2016–2024.....	173
Σχήμα 4.59. Σχέση μεταξύ της ημερήσιας μεταβολής της μέσης θερμοκρασίας και της ημερήσιας μεταβολής της συγκέντρωσης PM_{10} ανά εποχή στον σταθμό Αριστοτέλους κατά την περίοδο 2016–2024.....	175
Σχήμα 4.60. Σχέση μεταξύ της ημερήσιας μεταβολής της μέσης θερμοκρασίας και της ημερήσιας μεταβολής της συγκέντρωσης PM_{10} ανά εποχή στον σταθμό Ελευσίνας κατά την περίοδο 2016–2024.....	176
Σχήμα 4.61. Σχέση μεταξύ της ημερήσιας μεταβολής της μέσης θερμοκρασίας και της ημερήσιας μεταβολής της συγκέντρωσης PM_{10} ανά εποχή στον σταθμό Θρακομακεδόνων κατά την περίοδο 2016–2024.....	176
Σχήμα 4.62. Σχέση μεταξύ της ημερήσιας μεταβολής της μέσης θερμοκρασίας και της ημερήσιας μεταβολής της συγκέντρωσης PM_{10} ανά εποχή στον σταθμό Λυκόβρυσης κατά την περίοδο 2016–2024.....	177
Σχήμα 4.63. Κατανομή της ημερήσιας μεταβολής της συγκέντρωσης PM_{10} ανά κατηγορία ημερήσιας μεταβολής της μέσης θερμοκρασίας και εποχή στον σταθμό Αριστοτέλους κατά την περίοδο 2016–2024.....	180
Σχήμα 4.64. Κατανομή της ημερήσιας μεταβολής της συγκέντρωσης PM_{10} ανά κατηγορία ημερήσιας μεταβολής της μέσης θερμοκρασίας και εποχή στον σταθμό Ελευσίνας κατά την περίοδο 2016–2024.....	180
Σχήμα 4.65. Κατανομή της ημερήσιας μεταβολής της συγκέντρωσης PM_{10} ανά κατηγορία ημερήσιας μεταβολής της μέσης θερμοκρασίας και εποχή στον σταθμό Θρακομακεδόνων κατά την περίοδο 2016–2024.....	181
Σχήμα 4.66. Κατανομή της ημερήσιας μεταβολής της συγκέντρωσης PM_{10} ανά κατηγορία ημερήσιας μεταβολής της μέσης θερμοκρασίας και εποχή στον σταθμό Λυκόβρυσης κατά την περίοδο 2016–2024.....	181
Σχήμα 4.67. Σχέση μεταξύ της ημερήσιας μέσης θερμοκρασίας και της ημερήσιας μέσης συγκέντρωσης SO_2 ανά εποχή στον σταθμό Αριστοτέλους κατά την περίοδο 2016–2024.....	190

Σχήμα 4.68. Σχέση μεταξύ της ημερήσιας μέσης θερμοκρασίας και της ημερήσιας μέσης συγκέντρωσης SO ₂ ανά εποχή στον σταθμό Ελευσίνας κατά την περίοδο 2016–2024.....	190
Σχήμα 4.69. Σχέση μεταξύ της ημερήσιας μέσης θερμοκρασίας και της ημερήσιας μέσης συγκέντρωσης SO ₂ ανά εποχή στον σταθμό Πατησίων κατά την περίοδο 2016–2024.....	191
Σχήμα 4.70. Σχέση μεταξύ της ημερήσιας μεταβολής της μέσης θερμοκρασίας και της ημερήσιας μεταβολής της συγκέντρωσης SO ₂ ανά εποχή στον σταθμό Αριστοτέλους κατά την περίοδο 2016–2024.....	194
Σχήμα 4.71. Σχέση μεταξύ της ημερήσιας μεταβολής της μέσης θερμοκρασίας και της ημερήσιας μεταβολής της συγκέντρωσης SO ₂ ανά εποχή στον σταθμό Ελευσίνας κατά την περίοδο 2016–2024.....	195
Σχήμα 4.72. Σχέση μεταξύ της ημερήσιας μεταβολής της μέσης θερμοκρασίας και της ημερήσιας μεταβολής της συγκέντρωσης SO ₂ ανά εποχή στον σταθμό Πατησίων κατά την περίοδο 2016–2024.....	195
Σχήμα 4.73. Κατανομή της ημερήσιας μεταβολής της συγκέντρωσης SO ₂ ανά κατηγορία ημερήσιας μεταβολής της μέσης θερμοκρασίας και εποχή στον σταθμό Αριστοτέλους κατά την περίοδο 2016–2024.....	198
Σχήμα 4.74. Κατανομή της ημερήσιας μεταβολής της συγκέντρωσης SO ₂ ανά κατηγορία ημερήσιας μεταβολής της μέσης θερμοκρασίας και εποχή στον σταθμό Ελευσίνας κατά την περίοδο 2016–2024.....	199
Σχήμα 4.75. Κατανομή της ημερήσιας μεταβολής της συγκέντρωσης SO ₂ ανά κατηγορία ημερήσιας μεταβολής της μέσης θερμοκρασίας και εποχή στον σταθμό Πατησίων κατά την περίοδο 2016–2024.....	199
Σχήμα 4.76. Σύγκριση της απόλυτης τιμής του συντελεστή συσχέτισης Pearson για την ισχυρότερη σχέση μεταξύ της ημερήσιας μεταβολής της θερμοκρασίας και της ημερήσιας μεταβολής της συγκέντρωσης κάθε εξεταζόμενου ρύπου.....	207

Κατάλογος Πινάκων

Πίνακας 2.1. Χωρικός και λειτουργικός χαρακτηρισμός των σταθμών και ρύποι που εξετάζονται στην παρούσα εργασία.....	12
Πίνακας 2.2 Ενδεικτικές μελέτες για τις μετεωρολογικές και χωροχρονικές συνθήκες που συνδέονται με την ατμοσφαιρική ρύπανση και το θερμοκρασιακό περιβάλλον της Αθήνας.....	47
Πίνακας 3.1. Σταθμοί ΕΔΠΑΡ που χρησιμοποιήθηκαν στην παρούσα εργασία και ερμηνευτικός τους ρόλος.....	57
Πίνακας 3.2 Πηγές δεδομένων, μεταβλητές και τρόπος αξιοποίησής τους στην παρούσα εργασία.....	62
Πίνακας 3.3 Αντιστοίχιση των σταθμών ατμοσφαιρικής ρύπανσης του ΕΔΠΑΡ με τους μετεωρολογικούς σταθμούς της ΕΜΥ και βασική αιτιολόγηση των επιλογών.....	64
Πίνακας 3.4 Μετεωρολογική ταξινόμηση των εποχών που εφαρμόστηκε στην ανάλυση.....	70
Πίνακας 4.1α. Πληρότητα και χρονική διαθεσιμότητα των δεδομένων ατμοσφαιρικών ρύπων στον σταθμό Αριστοτέλους κατά την περίοδο 2016–2024.....	84
Πίνακας 4.1β. Πληρότητα και χρονική διαθεσιμότητα των δεδομένων ατμοσφαιρικών ρύπων στον σταθμό Ελευσίνας κατά την περίοδο 2016–2024.	84
Πίνακας 4.1γ. Πληρότητα και χρονική διαθεσιμότητα των δεδομένων ατμοσφαιρικών ρύπων στον σταθμό Θρακομακεδόνων κατά την περίοδο 2016–2024.....	85
Πίνακας 4.1δ. Πληρότητα και χρονική διαθεσιμότητα των δεδομένων ατμοσφαιρικών ρύπων στον σταθμό Λυκόβρυσης κατά την περίοδο 2016–2024.	85
Πίνακας 4.1ε. Πληρότητα και χρονική διαθεσιμότητα των δεδομένων ατμοσφαιρικών ρύπων στον σταθμό Πατησίων κατά την περίοδο 2016–2024.	85
Πίνακας 4.2. Περιγραφικά στατιστικά στοιχεία της ημερήσιας μέσης θερμοκρασίας στους μετεωρολογικούς σταθμούς Ελευσίνας, Ελληνικού και Τατοΐου κατά την περίοδο 2016–2024.....	87
Πίνακας 4.3α. Περιγραφικά στατιστικά στοιχεία των ημερήσιων συγκεντρώσεων των ατμοσφαιρικών ρύπων στον σταθμό Αριστοτέλους κατά την περίοδο 2016–2024. Οι συγκεντρώσεις εκφράζονται σε $\mu\text{g}/\text{m}^3$	89
Πίνακας 4.3β. Περιγραφικά στατιστικά στοιχεία των ημερήσιων συγκεντρώσεων των ατμοσφαιρικών ρύπων στον σταθμό Ελευσίνας κατά την περίοδο 2016–2024. Οι συγκεντρώσεις εκφράζονται σε $\mu\text{g}/\text{m}^3$	90
Πίνακας 4.3γ. Περιγραφικά στατιστικά στοιχεία των ημερήσιων συγκεντρώσεων των ατμοσφαιρικών ρύπων στον σταθμό Θρακομακεδόνων κατά την περίοδο 2016–2024. Οι συγκεντρώσεις εκφράζονται σε $\mu\text{g}/\text{m}^3$	90
Πίνακας 4.3δ. Περιγραφικά στατιστικά στοιχεία των ημερήσιων συγκεντρώσεων των ατμοσφαιρικών ρύπων στον σταθμό Λυκόβρυσης κατά την περίοδο 2016–2024. Οι συγκεντρώσεις εκφράζονται σε $\mu\text{g}/\text{m}^3$	91
Πίνακας 4.3ε. Περιγραφικά στατιστικά στοιχεία των ημερήσιων συγκεντρώσεων των ατμοσφαιρικών ρύπων στον σταθμό Πατησίων κατά την περίοδο 2016–2024. Οι συγκεντρώσεις εκφράζονται σε $\mu\text{g}/\text{m}^3$	92
Πίνακας 4.4. Συγκεντρωτικά αποτελέσματα της απλής γραμμικής παλινδρόμησης μεταξύ της ημερήσιας μέσης θερμοκρασίας και της ημερήσιας μέσης συγκέντρωσης NO , ανά σταθμό μέτρησης και εποχή, κατά την περίοδο 2016–2024.	126
Πίνακας 4.5. Συγκεντρωτικά αποτελέσματα της απλής γραμμικής παλινδρόμησης μεταξύ της ημερήσιας μεταβολής της μέσης θερμοκρασίας και της ημερήσιας μεταβολής της συγκέντρωσης NO , ανά σταθμό μέτρησης και εποχή, κατά την περίοδο 2016–2024.....	127

Πίνακας 4.6. Συγκεντρωτικά αποτελέσματα της απλής γραμμικής παλινδρόμησης μεταξύ της ημερήσιας μέσης θερμοκρασίας και της ημερήσιας μέσης συγκέντρωσης NO ₂ , ανά σταθμό μέτρησης και εποχή, κατά την περίοδο 2016–2024.....	147
Πίνακας 4.7. Συγκεντρωτικά αποτελέσματα της απλής γραμμικής παλινδρόμησης μεταξύ της ημερήσιας μεταβολής της μέσης θερμοκρασίας και της ημερήσιας μεταβολής της συγκέντρωσης NO ₂ , ανά σταθμό μέτρησης και εποχή, κατά την περίοδο 2016–2024.....	148
Πίνακας 4.8. Στατιστικά αποτελέσματα της απλής γραμμικής παλινδρόμησης μεταξύ της ημερήσιας μέσης θερμοκρασίας και της ημερήσιας μέσης συγκέντρωσης O ₃ , ανά σταθμό μέτρησης και εποχή, κατά την περίοδο 2016–2024.....	167
Πίνακας 4.9. Στατιστικά αποτελέσματα της απλής γραμμικής παλινδρόμησης μεταξύ της ημερήσιας μεταβολής της μέσης θερμοκρασίας και της ημερήσιας μεταβολής της συγκέντρωσης O ₃ , ανά σταθμό μέτρησης και εποχή, κατά την περίοδο 2016–2024.....	167
Πίνακας 4.10 Συγκεντρωτικά αποτελέσματα της απλής γραμμικής παλινδρόμησης μεταξύ της ημερήσιας μέσης θερμοκρασίας και της ημερήσιας μέσης συγκέντρωσης PM ₁₀ , ανά σταθμό και εποχή, κατά την περίοδο 2016–2024.	184
Πίνακας 4.11 Συγκεντρωτικά αποτελέσματα της απλής γραμμικής παλινδρόμησης μεταξύ της ημερήσιας μεταβολής της μέσης θερμοκρασίας και της ημερήσιας μεταβολής της συγκέντρωσης PM ₁₀ , ανά σταθμό και εποχή, κατά την περίοδο 2016–2024.	185
Πίνακας 4.12. Συγκεντρωτικά αποτελέσματα της σχέσης μεταξύ της ημερήσιας μέσης θερμοκρασίας και της ημερήσιας μέσης συγκέντρωσης SO ₂ ανά σταθμό και εποχή, κατά την περίοδο 2016–2024.....	202
Πίνακας 4.13. Συγκεντρωτικά αποτελέσματα της σχέσης μεταξύ της ημερήσιας μεταβολής της θερμοκρασίας και της ημερήσιας μεταβολής της συγκέντρωσης SO ₂ ανά σταθμό και εποχή, κατά την περίοδο 2016–2024.....	203
Πίνακας 4.14. Συγκριτική παρουσίαση των ισχυρότερων σχέσεων μεταξύ της ημερήσιας μεταβολής της θερμοκρασίας και της ημερήσιας μεταβολής των συγκεντρώσεων των εξεταζόμενων ατμοσφαιρικών ρύπων, κατά την περίοδο 2016–2024.	206

Συντομογραφίες, Ακρωνύμια και Σύμβολα

ΔΡ	Ημερήσια μεταβολή της συγκέντρωσης ατμοσφαιρικού ρύπου
ΔΤ	Ημερήσια μεταβολή της θερμοκρασίας
ΕΔΠΑΡ	Εθνικό Δίκτυο Παρακολούθησης Ατμοσφαιρικής Ρύπανσης
ΕΕ	Ευρωπαϊκή Ένωση
ΕΜΥ	Εθνική Μετεωρολογική Υπηρεσία
ΕΕΑ	Ευρωπαϊκός Οργανισμός Περιβάλλοντος
CO	Μονοξείδιο του άνθρακα
n	Αριθμός παρατηρήσεων
NO	Μονοξείδιο του αζώτου
NO ₂	Διοξείδιο του αζώτου
NO _x	Οξείδια του αζώτου
O ₃	Όζον
p	Τιμή στατιστικής σημαντικότητας
β	Μη τυποποιημένη κλίση της απλής γραμμικής παλινδρόμησης
PM ₁₀	Αιωρούμενα σωματίδια με αεροδυναμική διάμετρο ίση ή μικρότερη από 10 μm
PM _{2.5}	Αιωρούμενα σωματίδια με αεροδυναμική διάμετρο ίση ή μικρότερη από 2,5 μm
r	Συντελεστής γραμμικής συσχέτισης Pearson
R ²	Συντελεστής προσδιορισμού
SO ₂	Διοξείδιο του θείου
VOC	Πτητική οργανική ένωση
VOCs	Πτητικές οργανικές ενώσεις
WHO	Παγκόσμιος Οργανισμός Υγείας

Τα 5 σημαντικότερα σημεία της εργασίας

- Αναλύθηκε η σχέση θερμοκρασίας και πέντε ρύπων στην Αθήνα την περίοδο 2016–2024.
- Η ανάλυση κάλυψε πέντε σταθμούς διαφορετικού χωρικού και λειτουργικού χαρακτήρα.
- Το O_3 παρουσίασε τις σαφέστερες θετικές σχέσεις με τη θερμοκρασία.
- Τα NO και NO_2 εμφάνισαν συχνότερα αρνητικές σχέσεις, κυρίως στις ψυχρές εποχές.
- Οι ημερήσιες μεταβολές έδωσαν ασθενέστερες σχέσεις από τις ημερήσιες μέσες τιμές.

Συνεισφορά Εργασίας

Η παρούσα εργασία συμβάλλει στη συστηματική διερεύνηση της σχέσης μεταξύ θερμοκρασίας και ποιότητας του αέρα στο λεκανοπέδιο της Αθήνας κατά την περίοδο 2016–2024. Η ανάλυση περιλαμβάνει πέντε ατμοσφαιρικούς ρύπους και σταθμούς διαφορετικού χωρικού και λειτουργικού χαρακτήρα, επιτρέποντας την ανάδειξη εποχικών και χωρικών διαφοροποιήσεων. Ιδιαίτερη συνεισφορά αποτελεί η παράλληλη εξέταση τόσο των ημερήσιων μέσων τιμών όσο και των μεταβολών μεταξύ διαδοχικών ημερών, μέσω της οποίας διακρίνονται οι ευρύτερες εποχικές σχέσεις από τις βραχυχρόνιες συν-μεταβολές. Τα αποτελέσματα συνδέονται με τις πηγές εκπομπής, τη φωτοχημική δραστηριότητα και τις συνθήκες ατμοσφαιρικής διασποράς, προσφέροντας ένα οργανωμένο πλαίσιο ερμηνείας της σχέσης θερμοκρασίας και ατμοσφαιρικής ρύπανσης σε ένα σύνθετο μεσογειακό αστικό περιβάλλον.

1. Εισαγωγή

1.1 Αντικείμενο της εργασίας

Η παρούσα διπλωματική εργασία διερευνά τη σχέση μεταξύ της θερμοκρασίας και της ατμοσφαιρικής ρύπανσης στο λεκανοπέδιο της Αθήνας κατά την περίοδο 2016–2024. Ειδικότερα, εξετάζεται κατά πόσο η ημερήσια μέση θερμοκρασία και οι μεταβολές της μεταξύ διαδοχικών ημερών συνδέονται με τις συγκεντρώσεις και τις ημερήσιες μεταβολές των ατμοσφαιρικών ρύπων NO , NO_2 , O_3 , PM_{10} και SO_2 . Το λεκανοπέδιο της Αθήνας αποτελεί κατάλληλη περιοχή μελέτης, καθώς συνδυάζει έντονη αστική και κυκλοφοριακή δραστηριότητα, βιομηχανικά επηρεασμένες ζώνες και σημαντικές διαφοροποιήσεις μεταξύ κεντρικών, προαστιακών και περιαστικών περιοχών. Παράλληλα, η γεωμορφολογία του, η παρουσία ορεινών όγκων και η γειτνίαση με τον Σαρωνικό Κόλπο επηρεάζουν τις συνθήκες αερισμού, διασποράς και μεταφοράς των ατμοσφαιρικών ρύπων. Οι εξεταζόμενοι ρύποι επιλέχθηκαν επειδή αντιπροσωπεύουν διαφορετικές πηγές και μηχανισμούς σχηματισμού. Τα NO και NO_2 συνδέονται κυρίως με διεργασίες καύσης και οδική κυκλοφορία, το O_3 αποτελεί δευτερογενή φωτοχημικό ρύπο, τα PM_{10} έχουν τόσο φυσικές όσο και ανθρωπογενείς πηγές, ενώ το SO_2 σχετίζεται κυρίως με καύσεις καυσίμων που περιέχουν θείο και με ορισμένες βιομηχανικές ή ενεργειακές δραστηριότητες.

Η ανάλυση βασίζεται σε δύο συμπληρωματικές προσεγγίσεις. Η πρώτη εξετάζει τη σχέση μεταξύ ημερήσιας μέσης θερμοκρασίας και ημερήσιων μέσων συγκεντρώσεων των ρύπων, ενώ η δεύτερη επικεντρώνεται στις ημερήσιες μεταβολές τους. Με τον τρόπο αυτό διερευνώνται τόσο οι ευρύτερες εποχικές σχέσεις όσο και οι βραχυχρόνιες συν-μεταβολές θερμοκρασίας και ατμοσφαιρικών ρύπων. Τα δεδομένα ατμοσφαιρικής ρύπανσης προέρχονται από τους σταθμούς Αριστοτέλους, Πατησίων, Ελευσίνας, Λυκόβρυσης και Θρακομακεδόνων του Εθνικού Δικτύου Παρακολούθησης Ατμοσφαιρικής Ρύπανσης. Τα δεδομένα αυτά συνδυάζονται με θερμοκρασιακές παρατηρήσεις από τους μετεωρολογικούς σταθμούς Ελευσίνας, Ελληνικού και Τατοΐου. Η ανάλυση πραγματοποιείται σε ημερήσια και εποχική βάση, ώστε να εξεταστούν οι διαφοροποιήσεις ανά ρύπο, εποχή και σταθμό μέτρησης.

1.2 Σκοπός και στόχοι

Σκοπός της εργασίας είναι η ποσοτική διερεύνηση της σχέσης μεταξύ θερμοκρασίας και βασικών ατμοσφαιρικών ρύπων στο λεκανοπέδιο της Αθήνας κατά την περίοδο 2016–2024. Η θερμοκρασία εξετάζεται τόσο ως ημερήσια μέση τιμή όσο και ως μεταβολή μεταξύ διαδοχικών ημερών, ώστε να αποτυπωθούν αφενός οι ευρύτερες χρονικές και εποχικές σχέσεις και αφετέρου οι βραχυχρόνιες συν-μεταβολές της με τις συγκεντρώσεις των ρύπων. Η εργασία δεν αποσκοπεί στην τεκμηρίωση άμεσης αιτιώδους επίδρασης της θερμοκρασίας στις συγκεντρώσεις των ατμοσφαιρικών ρύπων. Οι συγκεντρώσεις αυτές επηρεάζονται από πολλούς παράγοντες, όπως οι τοπικές εκπομπές, οι άνεμοι, η υγρασία, η βροχόπτωση, η ηλιακή ακτινοβολία και οι συνθήκες ατμοσφαιρικής διασποράς. Στόχος είναι η αποτύπωση και ερμηνεία στατιστικών σχέσεων, εντός των ορίων των διαθέσιμων δεδομένων και της εφαρμοζόμενης μεθοδολογίας.

Οι ειδικότεροι στόχοι της εργασίας είναι:

1. η συγκέντρωση, ο ποιοτικός έλεγχος και η οργάνωση των δεδομένων θερμοκρασίας και ατμοσφαιρικής ρύπανσης για την περίοδο 2016–2024,
2. η δημιουργία συγκρίσιμων ημερήσιων χρονοσειρών θερμοκρασίας και συγκεντρώσεων ρύπων,
3. ο υπολογισμός των ημερήσιων μεταβολών της θερμοκρασίας και των συγκεντρώσεων των NO, NO₂, O₃, PM₁₀ και SO₂,
4. η διερεύνηση της σχέσης μεταξύ ημερήσιας μέσης θερμοκρασίας και ημερήσιων μέσων συγκεντρώσεων των ρύπων,
5. η διερεύνηση της σχέσης μεταξύ ημερήσιων μεταβολών θερμοκρασίας και ημερήσιων μεταβολών συγκεντρώσεων,
6. η εξέταση της εποχικής και χωρικής διαφοροποίησης των παραπάνω σχέσεων,
7. η εφαρμογή ανάλυσης συσχέτισης και απλής γραμμικής παλινδρόμησης,
8. η ερμηνεία των αποτελεσμάτων σε σχέση με τις πηγές εκπομπής, τη φωτοχημική συμπεριφορά των ρύπων και τις συνθήκες ατμοσφαιρικής διασποράς.

Η επίτευξη των παραπάνω στόχων επιτρέπει τη συγκριτική αποτύπωση της σχέσης μεταξύ θερμοκρασίας και ποιότητας του αέρα στο λεκανοπέδιο της Αθήνας.

1.3 Ερευνητικά ερωτήματα

Η παρούσα διπλωματική εργασία οργανώνεται γύρω από τέσσερα βασικά ερευνητικά ερωτήματα, τα οποία απορρέουν από τον σκοπό και τους επιμέρους στόχους της έρευνας. Τα ερωτήματα αφορούν τη σχέση της θερμοκρασίας με τις συγκεντρώσεις των ατμοσφαιρικών ρύπων, τη συμπεριφορά των ημερήσιων μεταβολών, καθώς και την εποχική και χωρική διαφοροποίηση των εξεταζόμενων σχέσεων.

ΕΕ1: Υπάρχουν στατιστικά σημαντικές σχέσεις μεταξύ της ημερήσιας μέσης θερμοκρασίας και των ημερήσιων μέσων συγκεντρώσεων των NO, NO₂, O₃, PM₁₀ και SO₂ στο λεκανοπέδιο της Αθήνας; Ποια είναι η κατεύθυνση και η ένταση των σχέσεων για κάθε εξεταζόμενο ρύπο;

ΕΕ2: Υπάρχουν στατιστικά σημαντικές σχέσεις μεταξύ της ημερήσιας μεταβολής της θερμοκρασίας και της αντίστοιχης ημερήσιας μεταβολής των συγκεντρώσεων των εξεταζόμενων ατμοσφαιρικών ρύπων; Ποια είναι η κατεύθυνση, η ένταση και το ποσοστό της παρατηρούμενης μεταβλητότητας που περιγράφεται από τα αντίστοιχα γραμμικά μοντέλα;

ΕΕ3: Διαφοροποιούνται οι σχέσεις μεταξύ θερμοκρασίας και ατμοσφαιρικών ρύπων ανά εποχή του έτους; Σε ποιες εποχές παρατηρούνται ισχυρότερες, ασθενέστερες ή διαφορετικής κατεύθυνσης σχέσεις;

ΕΕ4: Διαφοροποιούνται οι σχέσεις μεταξύ θερμοκρασίας και ατμοσφαιρικών ρύπων ανάλογα με τον χωρικό και λειτουργικό χαρακτήρα του σταθμού μέτρησης; Σε ποιο βαθμό οι παρατηρούμενες διαφοροποιήσεις μπορούν να συνδεθούν με τα ιδιαίτερα χαρακτηριστικά των εξεταζόμενων περιοχών;

Η διατύπωση των παραπάνω ερευνητικών ερωτημάτων επιτρέπει τη σύνδεση της στατιστικής ανάλυσης με την περιβαλλοντική ερμηνεία των αποτελεσμάτων. Η έρευνα δεν περιορίζεται στην καταγραφή των συγκεντρώσεων των ρύπων, αλλά εξετάζει συστηματικά την κατεύθυνση, την ένταση, τη στατιστική σημαντικότητα και τη χωροχρονική διαφοροποίηση των σχέσεών τους με τη θερμοκρασία.

1.4 Συνεισφορά της εργασίας

Η συνεισφορά της παρούσας εργασίας εντοπίζεται στη συστηματική διερεύνηση της σχέσης μεταξύ θερμοκρασίας και ατμοσφαιρικής ρύπανσης στο λεκανοπέδιο της Αθήνας, με έμφαση τόσο στις ημερήσιες μέσες τιμές όσο και στις μεταβολές μεταξύ διαδοχικών ημερών. Η διπλή αυτή προσέγγιση επιτρέπει τη διάκριση μεταξύ των ευρύτερων χρονικών και εποχικών σχέσεων, που αποτυπώνονται στις απόλυτες ημερήσιες τιμές, και των βραχυχρόνιων συν-μεταβολών, που αναδεικνύονται μέσω των ημερήσιων διαφορών.

Σε μεθοδολογικό επίπεδο, η εργασία συνδυάζει ανάλυση συσχέτισης, απλή γραμμική παλινδρόμηση και εποχική ταξινόμηση των δεδομένων, εφαρμόζοντας την ανάλυση χωριστά ανά ρύπο, σταθμό και εποχή. Με τον τρόπο αυτό περιορίζεται ο κίνδυνος υπερβολικά γενικευμένων συμπερασμάτων και καθίσταται δυνατή η ανάδειξη διαφοροποιήσεων που σχετίζονται με τον χαρακτήρα κάθε σταθμού και τις εποχικές συνθήκες. Η χρήση επίσημων δεδομένων για την περίοδο 2016–2024 ενισχύει τη συνέπεια και την αξιοπιστία της εμπειρικής διερεύνησης.

Σε εμπειρικό επίπεδο, η εργασία εξετάζει πέντε βασικούς ατμοσφαιρικούς ρύπους, NO, NO₂, O₃, PM₁₀ και SO₂, σε σταθμούς που αντιπροσωπεύουν διαφορετικά χωρικά και λειτουργικά περιβάλλοντα του λεκανοπεδίου της Αθήνας. Η σύγκριση μεταξύ κυκλοφοριακά επιβαρυσμένων, αστικών, προαστιακών, περιαστικών και βιομηχανικά επηρεασμένων περιοχών συμβάλλει στην καλύτερη κατανόηση της χωρικής διαφοροποίησης της σχέσης θερμοκρασίας και ποιότητας του αέρα.

Σε ερμηνευτικό επίπεδο, η εργασία συνδέει τα στατιστικά αποτελέσματα με βασικούς περιβαλλοντικούς μηχανισμούς, όπως οι πηγές εκπομπής, η φωτοχημική δραστηριότητα, οι συνθήκες ατμοσφαιρικής διασποράς και τα γεωμορφολογικά χαρακτηριστικά του λεκανοπεδίου. Με αυτόν τον τρόπο, τα αποτελέσματα δεν παρουσιάζονται μόνο ως αριθμητικές σχέσεις, αλλά εντάσσονται σε ένα ευρύτερο περιβαλλοντικό πλαίσιο.

Η εργασία δεν αποδίδει άμεσες αιτιώδεις σχέσεις στη θερμοκρασία, καθώς η ατμοσφαιρική ρύπανση διαμορφώνεται από την ταυτόχρονη επίδραση πολλών παραγόντων. Ωστόσο, παρέχει ένα οργανωμένο και διαφανές πλαίσιο αποτύπωσης των στατιστικών συνδέσεων μεταξύ θερμοκρασίας και ατμοσφαιρικών ρύπων. Η προσέγγιση αυτή μπορεί να αποτελέσει βάση για μελλοντικές αναλύσεις που θα ενσωματώνουν πρόσθετες μετεωρολογικές μεταβλητές, εκπομπές και πιο σύνθετα στατιστικά ή πολυμεταβλητά μοντέλα.

1.5 Δομή της εργασίας

Η παρούσα διπλωματική εργασία οργανώνεται σε πέντε κεφάλαια, τα οποία ακολουθούν τη λογική πορεία από τη θεωρητική τεκμηρίωση και τη μεθοδολογία έως την παρουσίαση και ερμηνεία των αποτελεσμάτων.

Το πρώτο κεφάλαιο αποτελεί την εισαγωγή της εργασίας. Σε αυτό παρουσιάζονται το αντικείμενο της έρευνας, ο σκοπός και οι επιμέρους στόχοι, τα ερευνητικά ερωτήματα και η συνεισφορά της μελέτης.

Το δεύτερο κεφάλαιο περιλαμβάνει τη βιβλιογραφική επισκόπηση. Αναπτύσσονται οι βασικές έννοιες που σχετίζονται με την ποιότητα του αέρα, οι εξεταζόμενοι ατμοσφαιρικοί ρύποι και οι μηχανισμοί μέσω των οποίων η θερμοκρασία μπορεί να συνδέεται με τις συγκεντρώσεις τους. Επιπλέον, παρουσιάζονται προηγούμενες ελληνικές και διεθνείς μελέτες, ώστε να τεκμηριωθεί το ερευνητικό πλαίσιο της εργασίας.

Το τρίτο κεφάλαιο παρουσιάζει τη μεθοδολογία της έρευνας. Περιγράφονται η περιοχή μελέτης, οι σταθμοί μέτρησης, οι πηγές δεδομένων και η διαδικασία προεπεξεργασίας των χρονοσειρών. Στη συνέχεια αναφέρονται ο υπολογισμός των ημερήσιων τιμών και μεταβολών, η εποχική ταξινόμηση των δεδομένων και οι στατιστικές μέθοδοι που εφαρμόστηκαν.

Το τέταρτο κεφάλαιο περιλαμβάνει τα αποτελέσματα της ανάλυσης. Παρουσιάζονται τα περιγραφικά χαρακτηριστικά των δεδομένων, η διαχρονική και εποχική μεταβολή της θερμοκρασίας και των ρύπων, καθώς και οι σχέσεις μεταξύ θερμοκρασίας και ατμοσφαιρικής ρύπανσης ανά ρύπο, εποχή και σταθμό μέτρησης. Το κεφάλαιο ολοκληρώνεται με συγκριτική σύνθεση των βασικών ευρημάτων.

Το πέμπτο κεφάλαιο περιλαμβάνει τα συμπεράσματα της εργασίας. Συνοψίζονται τα κύρια ευρήματα, δίνονται απαντήσεις στα ερευνητικά ερωτήματα, παρουσιάζονται οι βασικοί περιορισμοί της μελέτης και διατυπώνονται προτάσεις για μελλοντική έρευνα.

2. Βιβλιογραφική Επισκόπηση

2.1 Ορισμός ποιότητας αέρα και βασικοί δείκτες

Η ποιότητα του αέρα αποτελεί βασική παράμετρο αξιολόγησης της περιβαλλοντικής κατάστασης και της έκθεσης του πληθυσμού στην ατμοσφαιρική ρύπανση. Ως ποιότητα του αέρα νοείται η κατάσταση της ατμόσφαιρας, όπως διαμορφώνεται από την παρουσία και τις συγκεντρώσεις αέριων ρύπων και αιωρούμενων σωματιδίων. Οι ρύποι μπορεί να προέρχονται τόσο από φυσικές διεργασίες όσο και από ανθρωπογενείς δραστηριότητες, όπως η οδική κυκλοφορία, η θέρμανση, η παραγωγή ενέργειας και η βιομηχανική δραστηριότητα. Η αξιολόγηση της ποιότητας του αέρα βασίζεται στην ποσοτική μέτρηση των συγκεντρώσεων και στη σύγκρισή τους με επιστημονικά ή νομοθετικά καθορισμένα επίπεδα αναφοράς (European Environment Agency, 2024· Κούγκουλος, 2022).

Σε διεθνές και ευρωπαϊκό επίπεδο χρησιμοποιούνται διαφορετικά αλλά συμπληρωματικά πλαίσια αξιολόγησης. Οι κατευθυντήριες οδηγίες του Παγκόσμιου Οργανισμού Υγείας βασίζονται κυρίως στην επιστημονική τεκμηρίωση των επιπτώσεων της ατμοσφαιρικής ρύπανσης στην υγεία και αφορούν ρύπους όπως τα $PM_{2.5}$, PM_{10} , O_3 , NO_2 , SO_2 και CO . Αντίστοιχα, η ευρωπαϊκή νομοθεσία καθορίζει δεσμευτικές οριακές τιμές, τιμές-στόχους και επίπεδα ενημέρωσης ή συναγερμού για συγκεκριμένους ρύπους. Τα επίπεδα αναφοράς του WHO είναι συχνά αυστηρότερα από τα ευρωπαϊκά όρια, καθώς διαμορφώνονται με κύριο γνώμονα την προστασία της υγείας, ενώ τα νομοθετικά όρια λαμβάνουν υπόψη και τεχνικές, κοινωνικές και οικονομικές παραμέτρους (WHO, 2021· Directive (EU) 2024/2881).

Η παρακολούθηση της ποιότητας του αέρα πραγματοποιείται μέσω οργανωμένων δικτύων σταθμών μέτρησης, τα οποία καταγράφουν συστηματικά τις συγκεντρώσεις επιλεγμένων ρύπων. Οι μετρήσεις αυτές επιτρέπουν την αποτίμηση της ατμοσφαιρικής επιβάρυνσης, την αναγνώριση επεισοδίων αυξημένης ρύπανσης και τη μελέτη των χωρικών και χρονικών διαφοροποιήσεων των συγκεντρώσεων.

Η ποιότητα του αέρα δεν καθορίζεται μόνο από την ένταση των εκπομπών, αλλά και από διεργασίες μεταφοράς, διασποράς, χημικού μετασχηματισμού και απομάκρυνσης των ρύπων. Οι διεργασίες αυτές επηρεάζονται από μετεωρολογικούς παράγοντες, όπως η θερμοκρασία, ο άνεμος, η ηλιακή ακτινοβολία, η υγρασία, η βροχόπτωση και η ατμοσφαιρική σταθερότητα (Seinfeld & Pandis, 2016). Για τον λόγο αυτό, η θερμοκρασία

αποτελεί κρίσιμη μεταβλητή για την ερμηνεία της χωροχρονικής μεταβλητότητας των ατμοσφαιρικών ρύπων που εξετάζονται στην παρούσα εργασία.

2.1.1 Βασικοί ατμοσφαιρικοί ρύποι και δείκτες ποιότητας του αέρα

Η αξιολόγηση της ποιότητας του αέρα βασίζεται στη συστηματική παρακολούθηση συγκεκριμένων ατμοσφαιρικών ρύπων, οι συγκεντρώσεις των οποίων χρησιμοποιούνται ως δείκτες της περιβαλλοντικής επιβάρυνσης και της έκθεσης του πληθυσμού. Οι ρύποι διαφοροποιούνται ως προς τις πηγές εκπομπής, τις φυσικοχημικές ιδιότητες, τον χρόνο παραμονής στην ατμόσφαιρα, τους μηχανισμούς μετασχηματισμού και απομάκρυνσης, καθώς και τις επιπτώσεις τους στην ανθρώπινη υγεία και στο περιβάλλον.

Οι ατμοσφαιρικοί ρύποι διακρίνονται γενικά σε πρωτογενείς και δευτερογενείς. Οι πρωτογενείς εκπέμπονται απευθείας στην ατμόσφαιρα από φυσικές ή ανθρωπογενείς πηγές, όπως η οδική κυκλοφορία, η θέρμανση, η βιομηχανία, οι λιμενικές δραστηριότητες και η παραγωγή ενέργειας. Αντίθετα, οι δευτερογενείς σχηματίζονται στην ατμόσφαιρα μέσω χημικών και φωτοχημικών αντιδράσεων μεταξύ πρόδρομων ενώσεων. Οι διεργασίες αυτές επηρεάζονται από μετεωρολογικές παραμέτρους, όπως η θερμοκρασία, η ηλιακή ακτινοβολία, η σχετική υγρασία, η ταχύτητα του ανέμου, το ύψος του ατμοσφαιρικού οριακού στρώματος και η ατμοσφαιρική σταθερότητα.

Στην παρούσα εργασία εξετάζονται οι ρύποι NO, NO₂, O₃, PM₁₀ και SO₂, καθώς αντιπροσωπεύουν διαφορετικές κατηγορίες ατμοσφαιρικής ρύπανσης και εμφανίζουν διαφορετικούς μηχανισμούς εκπομπής, σχηματισμού και μετασχηματισμού. Τα NO και NO₂ συνδέονται κυρίως με διεργασίες καύσης και με την οδική κυκλοφορία, το O₃ αποτελεί δευτερογενή φωτοχημικό ρύπο, τα PM₁₀ αποτελούν μίγμα σωματιδίων φυσικής και ανθρωπογενούς προέλευσης, ενώ το SO₂ σχετίζεται κυρίως με την καύση καυσίμων που περιέχουν θείο και με ορισμένες βιομηχανικές, ενεργειακές και λιμενικές δραστηριότητες. Ο Ευρωπαϊκός Δείκτης Ποιότητας Αέρα αποτελεί εργαλείο συνοπτικής αποτύπωσης της βραχυχρόνιας κατάστασης της ποιότητας του αέρα. Βασίζεται στις συγκεντρώσεις των PM_{2.5}, PM₁₀, O₃, NO₂ και SO₂ και κατατάσσει την ποιότητα του αέρα σε κατηγορίες, από καλή έως εξαιρετικά κακή. Παρότι είναι χρήσιμος για την ενημέρωση του κοινού και την επικοινωνία του κινδύνου, δεν χρησιμοποιείται ως μεταβλητή στην παρούσα εμπειρική ανάλυση. Η εργασία επικεντρώνεται στις επιμέρους ημερήσιες συγκεντρώσεις των

εξεταζόμενων ρύπων, καθώς αυτές επιτρέπουν την αναλυτικότερη διερεύνηση των σχέσεων τους με τη θερμοκρασία.

Τα PM_{10} είναι αιωρούμενα σωματίδια με αεροδυναμική διάμετρο ίση ή μικρότερη από 10 μm . Αποτελούν ετερογενές μίγμα σωματιδίων, το οποίο μπορεί να περιλαμβάνει ορυκτή σκόνη, θαλάσσια άλατα, οργανικό και στοιχειακό άνθρακα, θειικά και νιτρικά άλατα, μέταλλα και βιολογικά σωματίδια. Προέρχονται από πηγές όπως η οδική κυκλοφορία, η επαναιώρηση σκόνης, η οικιακή θέρμανση, οι βιομηχανικές και κατασκευαστικές δραστηριότητες, η μεταφορά εδαφικής σκόνης και οι δασικές πυρκαγιές. Οι συγκεντρώσεις τους επηρεάζονται από την ένταση των πηγών, τη βροχόπτωση, τον άνεμο, την ατμοσφαιρική στασιμότητα και το ύψος του ατμοσφαιρικού οριακού στρώματος. Η σχέση τους με τη θερμοκρασία δεν είναι μονοσήμαντη, καθώς οι θερμές και ξηρές συνθήκες μπορεί να ευνοούν την επαναιώρηση σκόνης, ενώ οι ψυχρές περίοδοι μπορεί να συνδέονται με αυξημένες εκπομπές από θέρμανση και δυσμενέστερη διασπορά.

Το NO είναι πρωτογενής αέριος ρύπος που παράγεται κυρίως από διεργασίες καύσης σε υψηλές θερμοκρασίες. Στις αστικές περιοχές η σημαντικότερη πηγή του είναι η οδική κυκλοφορία, ενώ πρόσθετες εκπομπές μπορεί να προέρχονται από βιομηχανικές εγκαταστάσεις, παραγωγή ενέργειας και συστήματα θέρμανσης. Λόγω της σύνδεσής του με άμεσες εκπομπές και της σχετικά υψηλής χημικής δραστηριότητάς του, εμφανίζει συχνά υψηλότερες συγκεντρώσεις κοντά σε πηγές καύσης και μειώνεται με την απομάκρυνση από αυτές. Παράλληλα, συμμετέχει ενεργά στον φωτοχημικό κύκλο $NO-NO_2-O_3$, καθώς αντιδρά με το O_3 και μετατρέπεται σε NO_2 . Η σχέση του με τη θερμοκρασία επηρεάζεται έμμεσα από τις εποχικές μεταβολές των εκπομπών, τις συνθήκες διασποράς και τη χημική του μετατροπή στην ατμόσφαιρα.

Το NO_2 αποτελεί βασικό αέριο ρύπο της αστικής ατμόσφαιρας και προέρχεται τόσο από άμεσες εκπομπές καύσης όσο και από την οξείδωση του NO . Έχει μεγαλύτερη περιβαλλοντική και υγειονομική σημασία από το NO , ενώ συμμετέχει στον φωτοχημικό σχηματισμό του τροποσφαιρικού όζοντος και στον σχηματισμό δευτερογενών νιτρικών σωματιδίων. Οι συγκεντρώσεις του επηρεάζονται από την ένταση των εκπομπών, την κυκλοφορία, την κατακόρυφη ανάμιξη, τον άνεμο, τη φωτοχημική δραστηριότητα και την ατμοσφαιρική σταθερότητα. Η σχέση του με τη θερμοκρασία μπορεί να διαφοροποιείται ανά εποχή και τύπο σταθμού, καθώς η θερμοκρασία συνδέεται τόσο με τις συνθήκες διασποράς όσο και με τη φωτοχημική του συμπεριφορά.

Το O_3 είναι δευτερογενής φωτοχημικός ρύπος και δεν εκπέμπεται άμεσα στην ατμόσφαιρα. Σχηματίζεται μέσω αντιδράσεων στις οποίες συμμετέχουν οξείδια του αζώτου και πτητικές οργανικές ενώσεις υπό την επίδραση της ηλιακής ακτινοβολίας. Οι συγκεντρώσεις του εμφανίζουν έντονη ημερήσια και εποχική μεταβλητότητα και είναι συνήθως υψηλότερες κατά τις θερμές και ηλιόλουστες περιόδους, όταν ενισχύεται η φωτοχημική δραστηριότητα. Σε περιοχές έντονης κυκλοφορίας μπορεί να μειώνεται λόγω αντίδρασης με το NO , ενώ σε προαστιακές και περιαστικές περιοχές μπορεί να εμφανίζει υψηλότερες τιμές λόγω μεταφοράς πρόδρομων ενώσεων και φωτοχημικής ωρίμανσης των αέριων μαζών. Για τον λόγο αυτό, η θερμοκρασία αναμένεται να συνδέεται συχνότερα θετικά με τις συγκεντρώσεις O_3 , χωρίς όμως η σχέση αυτή να είναι αποκλειστικά αιτιώδης.

Το SO_2 είναι κυρίως πρωτογενής αέριος ρύπος και παράγεται από την καύση καυσίμων που περιέχουν θείο, καθώς και από ορισμένες βιομηχανικές, ενεργειακές και λιμενικές δραστηριότητες. Μετά την εκπομπή του μπορεί να οξειδωθεί και να συμβάλει στον σχηματισμό θεικών αερολυμάτων και στην όξινη απόθεση. Οι συγκεντρώσεις του εξαρτώνται από τη χωρική θέση των πηγών, τον άνεμο, το ύψος ανάμιξης, την ατμοσφαιρική σταθερότητα και τις χημικές διεργασίες οξείδωσης. Η σχέση του με τη θερμοκρασία δεν είναι σταθερή, καθώς επηρεάζεται τόσο από εποχικές μεταβολές των εκπομπών όσο και από τις συνθήκες διασποράς και χημικού μετασχηματισμού.

Τα $PM_{2.5}$ και το CO αποτελούν επίσης σημαντικούς δείκτες ποιότητας του αέρα και περιλαμβάνονται σε διεθνή και ευρωπαϊκά συστήματα παρακολούθησης. Ωστόσο, δεν εντάσσονται στην ποσοτική ανάλυση της παρούσας εργασίας λόγω της περιορισμένης διαθεσιμότητας επαρκών και συγκρίσιμων ημερήσιων δεδομένων για το σύνολο των επιλεγμένων σταθμών και της εξεταζόμενης περιόδου. Για τον λόγο αυτό, η εμπειρική ανάλυση επικεντρώνεται στους ρύπους NO , NO_2 , O_3 , PM_{10} και SO_2 .

2.1.2 Ιδιαιτερότητες της ατμόσφαιρας των αστικών περιοχών

Η ατμόσφαιρα των αστικών περιοχών χαρακτηρίζεται από αυξημένη πολυπλοκότητα, καθώς οι συγκεντρώσεις των ατμοσφαιρικών ρύπων διαμορφώνονται από την αλληλεπίδραση ανθρωπογενών εκπομπών, μετεωρολογικών συνθηκών, μορφολογίας του δομημένου περιβάλλοντος και τοπικών φυσικοχημικών διεργασιών. Η υψηλή πυκνότητα πληθυσμού, η οδική κυκλοφορία, η ενεργειακή κατανάλωση, η θέρμανση και ψύξη των

κτιρίων, καθώς και οι βιομηχανικές και εμπορικές δραστηριότητες, δημιουργούν χωρικά και χρονικά διαφοροποιημένες πηγές εκπομπής.

Η πυκνή δόμηση επηρεάζει τη ροή του αέρα και τη διασπορά των ρύπων, καθώς τα κτίρια μεταβάλλουν την ταχύτητα και τη διεύθυνση του ανέμου και μπορούν να δημιουργούν περιοχές ανακυκλοφορίας ή περιορισμένου αερισμού. Σε αστικά φαράγγια, οι εκπομπές της οδικής κυκλοφορίας ενδέχεται να παραμένουν κοντά στο επίπεδο του δρόμου, οδηγώντας σε αυξημένες συγκεντρώσεις πρωτογενών ρύπων.

Παράλληλα, η αντικατάσταση φυσικών επιφανειών από άσφαλτο, σκυρόδεμα και άλλα τεχνητά υλικά μεταβάλλει το ενεργειακό ισοζύγιο της επιφάνειας. Η αποθήκευση θερμότητας, η περιορισμένη εξατμισοδιαπνοή, η μειωμένη παρουσία βλάστησης και οι ανθρωπογενείς εκλύσεις θερμότητας συμβάλλουν στη διαμόρφωση υψηλότερων θερμοκρασιών και στην εμφάνιση της αστικής θερμικής νησίδας.

Σημαντικό ρόλο διαδραματίζουν επίσης η ατμοσφαιρική σταθερότητα και το ύψος του ατμοσφαιρικού οριακού στρώματος. Η έντονη κατακόρυφη ανάμιξη ευνοεί τη διάχυση των ρύπων σε μεγαλύτερο όγκο αέρα, ενώ η σταθερότητα και οι θερμοκρασιακές αναστροφές περιορίζουν την κατακόρυφη μεταφορά και μπορούν να οδηγήσουν σε συσσώρευση ρύπων κοντά στην επιφάνεια.

Η γεωμορφολογία επηρεάζει καθοριστικά τις παραπάνω διεργασίες. Πόλεις που βρίσκονται σε λεκανοπέδια ή περιβάλλονται από ορεινούς όγκους ενδέχεται να παρουσιάζουν περιορισμένο φυσικό αερισμό, ιδιαίτερα υπό συνθήκες ασθενών ανέμων. Αντίθετα, η γειτνίαση με τη θάλασσα μπορεί να δημιουργεί τοπικά συστήματα κυκλοφορίας, όπως η θαλάσσια αύρα, τα οποία επηρεάζουν τη μεταφορά και τη χωρική κατανομή των ρύπων.

Το λεκανοπέδιο της Αθήνας αποτελεί χαρακτηριστικό παράδειγμα αστικού περιβάλλοντος στο οποίο αλληλεπιδρούν η γεωμορφολογία, η πυκνή δόμηση, οι ανθρωπογενείς εκπομπές και τα τοπικά συστήματα ατμοσφαιρικής κυκλοφορίας. Οι συγκεντρώσεις των ρύπων διαφοροποιούνται ανάλογα με την απόσταση από τις πηγές εκπομπής, τον χαρακτήρα της περιοχής, το υψόμετρο, την παρουσία βλάστησης και τις τοπικές συνθήκες αερισμού.

Για τον λόγο αυτό, η παρούσα εργασία εξετάζει σταθμούς διαφορετικού χωρικού και λειτουργικού χαρακτήρα, ώστε να διερευνηθούν οι διαφοροποιήσεις της σχέσης μεταξύ θερμοκρασίας και ατμοσφαιρικών ρύπων σε κυκλοφοριακά επιβαρυνμένες, αστικές, προαστιακές, περιαστικές και βιομηχανικά επηρεασμένες περιοχές.

2.1.3 Διαφορές μεταξύ σταθμών κυκλοφοριακής επιβάρυνσης, αστικού υποβάθρου, προαστιακού, περιαστικού και βιομηχανικά επηρεασμένου χαρακτήρα

Η χωρική κατανομή της ατμοσφαιρικής ρύπανσης δεν είναι ομοιόμορφη, ακόμη και στο εσωτερικό της ίδιας μητροπολιτικής περιοχής. Οι συγκεντρώσεις και η σύσταση των ρύπων διαφοροποιούνται ανάλογα με την ένταση και το είδος των τοπικών εκπομπών, την πυκνότητα και τη μορφολογία της δόμησης, την απόσταση από βασικούς οδικούς άξονες ή βιομηχανικές εγκαταστάσεις, το υψόμετρο και τις τοπικές συνθήκες αερισμού. Για τον λόγο αυτό, οι σταθμοί παρακολούθησης της ποιότητας του αέρα ταξινομούνται συνήθως με βάση τη χωρική τους θέση και το είδος των πηγών που επηρεάζουν κυρίως τις μετρήσεις τους.

Οι σταθμοί κυκλοφοριακής επιβάρυνσης βρίσκονται κοντά σε οδικούς άξονες αυξημένης κυκλοφορίας και αποτυπώνουν κυρίως τη συμβολή των εκπομπών από τα οχήματα. Σε αυτούς καταγράφονται συχνά υψηλότερες συγκεντρώσεις πρωτογενών ή κυκλοφοριακά συνδεδεμένων ρύπων, όπως το NO, το NO₂, το CO και τα αιωρούμενα σωματίδια, με έντονη ημερήσια μεταβλητότητα.

Οι σταθμοί αστικού υποβάθρου βρίσκονται σε πυκνοδομημένες περιοχές, αλλά σε σχετική απόσταση από άμεσες και έντονες πηγές εκπομπής. Οι μετρήσεις τους αποτυπώνουν τη γενικότερη ατμοσφαιρική επιβάρυνση του αστικού περιβάλλοντος και τη συνδυασμένη επίδραση της κυκλοφορίας, της θέρμανσης και άλλων αστικών δραστηριοτήτων.

Οι προαστιακοί και περιαστικοί σταθμοί βρίσκονται στις εξωτερικές ζώνες ή στην περιφέρεια του αστικού ιστού και επηρεάζονται συνήθως λιγότερο από άμεσες τοπικές εκπομπές. Στις θέσεις αυτές μεγαλύτερη σημασία μπορεί να έχουν η μεταφορά αέριων μαζών, η φωτοχημική ωρίμανση των πρόδρομων ενώσεων, η τοπογραφία και το υψόμετρο. Για τον λόγο αυτό, είναι δυνατό να καταγράφονται σχετικά αυξημένες συγκεντρώσεις O₃, ιδιαίτερα κατά τις θερμές και ηλιόλουστες περιόδους. Οι βιομηχανικά επηρεασμένοι σταθμοί βρίσκονται κοντά σε περιοχές έντονης βιομηχανικής, ενεργειακής ή λιμενικής δραστηριότητας. Οι συγκεντρώσεις τους μπορεί να διαμορφώνονται από διεργασίες καύσης, βιομηχανική παραγωγή, αποθήκευση και διακίνηση καυσίμων και δραστηριότητες μεταφορών. Στις περιοχές αυτές είναι δυνατό να εμφανίζονται αυξημένες συγκεντρώσεις SO₂, NO_x και αιωρούμενων σωματιδίων, ανάλογα με το είδος των εγκαταστάσεων, τη χρονική μεταβολή των εκπομπών και τις επικρατούσες μετεωρολογικές συνθήκες.

Η παραπάνω κατηγοριοποίηση δεν αποτελεί απόλυτο διαχωρισμό, καθώς ένας σταθμός μπορεί να επηρεάζεται ταυτόχρονα από περισσότερες από μία κατηγορίες πηγών. Χρησιμοποιείται, ωστόσο, ως λειτουργικό εργαλείο για την ερμηνεία των μετρήσεων και

τη σύγκριση των σταθμών. Στην παρούσα εργασία η διαφοροποίηση αυτή είναι ιδιαίτερα σημαντική, καθώς επιτρέπει τη διερεύνηση της σχέσης μεταξύ θερμοκρασίας και ατμοσφαιρικών ρύπων υπό διαφορετικές συνθήκες εκπομπής, μεταφοράς, φωτοχημικού μετασχηματισμού και διασποράς.

Οι σταθμοί που χρησιμοποιούνται στην παρούσα εργασία και οι ρύποι που εξετάζονται σε κάθε περίπτωση παρουσιάζονται στον Πίνακα 2.1.

Σταθμός	Τύπος	Ρύποι που μελετώνται στην παρούσα εργασία
Πατησίων	Κυκλοφορίας	NO, NO ₂ , O ₃ , SO ₂
Αριστοτέλους	Αστικού υποβάθρου	NO, NO ₂ , SO ₂ , PM ₁₀
Λυκόβρυση	Προαστιακός	NO, NO ₂ , O ₃ , PM ₁₀
Θρακομακεδόνες	Περιαστικός	NO, NO ₂ , O ₃ , PM ₁₀
Ελευσίνα	Βιομηχανικός	NO, NO ₂ , O ₃ , SO ₂ , PM ₁₀

Πίνακας 2.1. Χωρικός και λειτουργικός χαρακτηρισμός των σταθμών και ρύποι που εξετάζονται στην παρούσα εργασία.

2.2 Παράγοντες που επηρεάζουν τη θερμοκρασία στο αστικό περιβάλλον

Η θερμοκρασία του αέρα στις αστικές περιοχές διαμορφώνεται από την αλληλεπίδραση των γενικότερων μετεωρολογικών συνθηκών με τα ιδιαίτερα χαρακτηριστικά του δομημένου περιβάλλοντος. Η ηλιακή ακτινοβολία, η νεφοκάλυψη, ο άνεμος και η μεταφορά αέριων μαζών αποτελούν βασικούς φυσικούς παράγοντες, ενώ η αστική γεωμετρία, οι ιδιότητες των δομικών υλικών, η παρουσία βλάστησης και οι ανθρωπογενείς εκλύσεις θερμότητας δημιουργούν σημαντικές τοπικές διαφοροποιήσεις.

Η αντικατάσταση της βλάστησης και του φυσικού εδάφους από αδιαπέρατες επιφάνειες μεταβάλλει την απορρόφηση, την αποθήκευση και την απόδοση της θερμότητας και

περιορίζει τη φυσική ψύξη μέσω εξατμισοδιαπνοής. Παράλληλα, η πυκνή δόμηση επηρεάζει τις ανταλλαγές ακτινοβολίας και τη ροή του αέρα, ενώ η κυκλοφορία, η θέρμανση, ο κλιματισμός και οι βιομηχανικές δραστηριότητες προσθέτουν ανθρωπογενή θερμότητα στο αστικό περιβάλλον.

Οι διεργασίες αυτές συμβάλλουν στη χωρική ανομοιογένεια της θερμοκρασίας και στην εμφάνιση της αστικής θερμικής νησίδας. Στις ακόλουθες υποενότητες εξετάζονται συνοπτικά η αστική γεωμετρία, η βλάστηση και τα δομικά υλικά, η ανθρωπογενής θερμότητα, η αστική θερμική νησίδα και η μεταβολή των θερμοκρασιακών συνθηκών στο πλαίσιο της κλιματικής αλλαγής.

2.2.1 Αστική γεωμετρία και μορφολογία του δομημένου περιβάλλοντος

Η αστική γεωμετρία αποτελεί βασικό παράγοντα διαμόρφωσης του θερμικού και ατμοσφαιρικού περιβάλλοντος μιας πόλης. Το ύψος και η πυκνότητα των κτιρίων, το πλάτος και ο προσανατολισμός των δρόμων, η αναλογία μεταξύ ύψους κτιρίων και πλάτους οδού, καθώς και η συνολική διάταξη του αστικού ιστού επηρεάζουν την πρόσπτωση της ηλιακής ακτινοβολίας, τη σκίαση, την αποθήκευση και αποβολή θερμότητας, καθώς και τη ροή του αέρα.

Ιδιαίτερη σημασία έχουν τα αστικά φαράγγια, όπου οι επιφάνειες των κτιρίων και του οδοστρώματος απορροφούν και αποθηκεύουν ηλιακή ενέργεια κατά τη διάρκεια της ημέρας. Ο μειωμένος συντελεστής θέασης του ουρανού και οι πολλαπλές ανταλλαγές ακτινοβολίας μεταξύ των αστικών επιφανειών περιορίζουν την απώλεια θερμότητας, ιδιαίτερα κατά τη διάρκεια της νύχτας, με αποτέλεσμα να επιβραδύνεται η ψύξη του αστικού ιστού.

Η μορφολογία του δομημένου περιβάλλοντος επηρεάζει επίσης τον φυσικό αερισμό και τη διασπορά των ατμοσφαιρικών ρύπων. Σε περιοχές με υψηλή πυκνότητα δόμησης και περιορισμένη κυκλοφορία αέρα μπορεί να παρατηρούνται αυξημένες νυχτερινές θερμοκρασίες και συσσώρευση πρωτογενών ρύπων κοντά στην επιφάνεια. Αντίθετα, περιοχές με αραιότερη δόμηση, περισσότερους ανοικτούς χώρους και καλύτερη σύνδεση με τοπικά ρεύματα αέρα μπορεί να παρουσιάζουν αποτελεσματικότερη απομάκρυνση θερμότητας και καλύτερη διασπορά ρύπων.

Στο λεκανοπέδιο της Αθήνας, η ποικιλία της μορφολογίας του αστικού ιστού δημιουργεί σημαντικές τοπικές διαφοροποιήσεις. Οι πυκνοδομημένες κεντρικές περιοχές χαρακτηρίζονται συχνά από στενότερους δρόμους, υψηλότερη κυκλοφοριακή επιβάρυνση και περιορισμένη παρουσία πρασίνου. Αντίθετα, σε αρκετές προαστιακές και περιαστικές ζώνες παρατηρούνται αραιότερη δόμηση, μεγαλύτερα υψόμετρα, περισσότερες ανοικτές ή φυτεμένες επιφάνειες και ευνοϊκότερες συνθήκες φυσικού αερισμού. Οι διαφοροποιήσεις αυτές είναι σημαντικές για την ερμηνεία των μετρήσεων, καθώς επηρεάζουν τόσο τη θερμοκρασία όσο και τις συνθήκες διασποράς των ρύπων.

2.2.2 Βλάστηση και δομικά υλικά

Η παρουσία βλάστησης και οι θερμικές και ακτινοβολικές ιδιότητες των δομικών υλικών επηρεάζουν σημαντικά τη θερμοκρασία στις αστικές περιοχές. Τα δέντρα, οι χώροι πρασίνου και οι φυτεμένες επιφάνειες μπορούν να περιορίζουν τη θερμική επιβάρυνση μέσω της σκίασης και της εξατμισοδιαπνοής. Μέρος της διαθέσιμης ενέργειας καταναλώνεται ως λανθάνουσα θερμότητα για την εξάτμιση του νερού, μειώνοντας τη θέρμανση των επιφανειών και, υπό κατάλληλες συνθήκες, του υπερκείμενου αέρα. Οι χώροι πρασίνου μπορούν να λειτουργούν ως τοπικές ζώνες χαμηλότερων επιφανειακών και ατμοσφαιρικών θερμοκρασιών, επηρεάζοντας το μικροκλίμα των γειτονικών περιοχών. Η ένταση της επίδρασης εξαρτάται από την πυκνότητα, το ύψος και το είδος της βλάστησης, τη διαθεσιμότητα νερού, τη μορφολογία του αστικού ιστού, την εποχή και τις συνθήκες αερισμού. Η βλάστηση μπορεί επίσης να επηρεάζει την ποιότητα του αέρα, καθώς οι φυτικές επιφάνειες συγκρατούν μέρος των αιωρούμενων σωματιδίων και απορροφούν ορισμένους αέριους ρύπους. Ωστόσο, σε στενούς και πυκνοδομημένους δρόμους, η πολύ πυκνή ή ακατάλληλα χωροθετημένη φύτευση μπορεί να περιορίζει τη ροή του αέρα και να δυσχεραίνει τη διασπορά των ρύπων.

Εξίσου σημαντικό ρόλο διαδραματίζουν τα υλικά των αστικών επιφανειών. Η ασφαλτος, το σκυρόδεμα και άλλα συμβατικά δομικά υλικά απορροφούν και αποθηκεύουν σημαντικές ποσότητες ηλιακής ενέργειας κατά τη διάρκεια της ημέρας και αποδίδουν μέρος της θερμότητας στο περιβάλλον μετά τη δύση του ήλιου, συμβάλλοντας στη διατήρηση υψηλότερων νυχτερινών θερμοκρασιών. Η θερμική συμπεριφορά των υλικών εξαρτάται

από την ανακλαστικότητα, τη θερμοχωρητικότητα, τη θερμική αγωγιμότητα και την εκπεμπτικότητα τους. Οι σκουρόχρωμες επιφάνειες με χαμηλή ανακλαστικότητα απορροφούν μεγαλύτερο ποσοστό της προσπίπτουσας ηλιακής ακτινοβολίας, ενώ υλικά υψηλότερης ανακλαστικότητας μπορούν να εμφανίζουν χαμηλότερες επιφανειακές θερμοκρασίες. Η εκτεταμένη παρουσία αδιαπέρατων επιφανειών περιορίζει τη διήθηση και τη συγκράτηση του νερού και μειώνει τη δυνατότητα ψύξης μέσω εξάτμισης. Αντίθετα, οι διαπερατές και φυτεμένες επιφάνειες μπορούν να ενισχύσουν τη συγκράτηση νερού και την εξατμιστική ψύξη, υπό την προϋπόθεση επαρκούς διαθεσιμότητας υγρασίας.

Στην Αθήνα, η περιορισμένη παρουσία πρασίνου σε αρκετές πυκνοδομημένες περιοχές, σε συνδυασμό με την εκτεταμένη κάλυψη από ασφάλτο, σκυρόδεμα και άλλες αδιαπέρατες επιφάνειες, μπορεί να ενισχύει την αποθήκευση θερμότητας και τη θερμική επιβάρυνση. Αντίθετα, περιοχές με περισσότερη βλάστηση, αραιότερη δόμηση και μεγαλύτερη παρουσία ανοικτών ή διαπερατών χώρων εμφανίζουν συχνά ηπιότερες θερμοκρασιακές συνθήκες. Οι διαφοροποιήσεις αυτές συμβάλλουν στη χωρική ανομοιογένεια της θερμοκρασίας στο λεκανοπέδιο και συνδέονται έμμεσα με τις συνθήκες διασποράς και τις φυσικοχημικές διεργασίες που επηρεάζουν την ποιότητα του αέρα.

2.2.3 Κυκλοφορία, ενεργειακή κατανάλωση και ανθρωπογενής θερμότητα

Η ανθρωπογενής θερμότητα αποτελεί σημαντική συνιστώσα του αστικού ενεργειακού ισοζυγίου και προέρχεται από την κατανάλωση ενέργειας στο πλαίσιο των ανθρώπινων δραστηριοτήτων. Βασικές πηγές της είναι η λειτουργία των οχημάτων, τα συστήματα θέρμανσης και κλιματισμού, οι βιομηχανικές και εμπορικές δραστηριότητες, ο φωτισμός και η χρήση ηλεκτρικών συσκευών. Η συμβολή της είναι συνήθως μεγαλύτερη σε πυκνοδομημένες περιοχές με υψηλή συγκέντρωση πληθυσμού, έντονη κυκλοφορία και αυξημένη ενεργειακή ζήτηση. Η οδική κυκλοφορία συμβάλλει στη θερμική επιβάρυνση μέσω της λειτουργίας των κινητήρων, των θερμών καυσαερίων, των μηχανικών τριβών και της μεταφοράς θερμότητας από τα οχήματα προς το άμεσο περιβάλλον. Παράλληλα, αποτελεί σημαντική πηγή NO, NO₂, CO και αιωρούμενων σωματιδίων, τα οποία προέρχονται τόσο από τις εξατμίσεις όσο και από μη καυσαεριακές εκπομπές, όπως η φθορά των φρένων, των ελαστικών και του οδοστρώματος και η επαναιώρηση σκόνης. Σε περιοχές αυξημένης κυκλοφορίας, η ταυτόχρονη έκλυση θερμότητας και ρύπων μπορεί να

ενισχύει τις τοπικές διαφοροποιήσεις της θερμοκρασίας και της ποιότητας του αέρα, ιδιαίτερα υπό συνθήκες περιορισμένου αερισμού. Τα συστήματα θέρμανσης και κλιματισμού επηρεάζουν το αστικό θερμικό περιβάλλον με εποχικά διαφοροποιημένο τρόπο. Κατά τις ψυχρότερες περιόδους, η χρήση θέρμανσης αυξάνει την κατανάλωση καυσίμων και μπορεί να συμβάλλει στις εκπομπές NO_x , CO , αιωρούμενων σωματιδίων και, ανάλογα με το καύσιμο, SO_2 . Η επίδραση αυτή μπορεί να είναι εντονότερη όταν συνδυάζεται με ατμοσφαιρική σταθερότητα, θερμοκρασιακές αναστροφές και περιορισμένη διασπορά. Κατά τη θερινή περίοδο, η λειτουργία των συστημάτων κλιματισμού απορρίπτει θερμότητα στο εξωτερικό περιβάλλον και αυξάνει το τοπικό θερμικό φορτίο, ιδιαίτερα σε πυκνοδομημένες περιοχές. Οι βιομηχανικές και εμπορικές δραστηριότητες αποτελούν πρόσθετες πηγές ανθρωπογενούς θερμότητας και ατμοσφαιρικών εκπομπών. Οι διεργασίες καύσης, η λειτουργία μηχανημάτων, ο φωτισμός, η ψύξη και η θέρμανση μεγάλων εγκαταστάσεων απελευθερώνουν θερμότητα και, ανάλογα με το είδος της δραστηριότητας, μπορεί να συνοδεύονται από εκπομπές NO_x , SO_2 , CO , αιωρούμενων σωματιδίων και πτητικών οργανικών ενώσεων. Η ένταση των ανθρωπογενών εκλύσεων θερμότητας μεταβάλλεται κατά τη διάρκεια της ημέρας και του έτους. Οι μετακινήσεις και η λειτουργία των επιχειρήσεων δημιουργούν ημερήσια πρότυπα, ενώ η θέρμανση και η ψύξη παρουσιάζουν έντονη εποχικότητα. Παράλληλα, η σχέση θερμοκρασίας και ενεργειακής κατανάλωσης είναι αμφίδρομη: οι χαμηλές θερμοκρασίες αυξάνουν τη ζήτηση για θέρμανση, ενώ οι υψηλές ενισχύουν τη χρήση συστημάτων ψύξης. Στο λεκανοπέδιο της Αθήνας, η έντονη κυκλοφοριακή δραστηριότητα, η πυκνή δόμηση και η υψηλή ενεργειακή ζήτηση συμβάλλουν στη χωρική και χρονική διαφοροποίηση των ανθρωπογενών εκλύσεων θερμότητας. Οι κεντρικές αστικές και κυκλοφοριακά επιβαρυνμένες περιοχές μπορεί να εμφανίζουν υψηλότερες ροές ανθρωπογενούς θερμότητας σε σχέση με αραιότερα δομημένες προαστιακές και περιαστικές ζώνες. Η ανθρωπογενής θερμότητα αλληλεπιδρά με τη γεωμετρία του αστικού ιστού, τις ιδιότητες των δομικών υλικών, την παρουσία βλάστησης και τις μετεωρολογικές συνθήκες, συμβάλλοντας στη διαφοροποίηση του αστικού θερμικού περιβάλλοντος και στην ενίσχυση της αστικής θερμικής νησίδας.

2.2.4 Αστική θερμική νησίδα

Η αστική θερμική νησίδα αποτελεί ένα από τα χαρακτηριστικότερα φαινόμενα του αστικού μικροκλίματος και περιγράφει τη θερμοκρασιακή διαφοροποίηση μεταξύ μιας αστικής περιοχής και μιας λιγότερο δομημένης περιοχής αναφοράς. Συνήθως εκδηλώνεται με υψηλότερες θερμοκρασίες στις πυκνοδομημένες αστικές ζώνες σε σύγκριση με προαστιακές, περιαστικές ή αγροτικές περιοχές. Η έντασή της μεταβάλλεται ανάλογα με την ώρα της ημέρας, την εποχή, τις μετεωρολογικές συνθήκες, τη χρήση γης και τα μορφολογικά χαρακτηριστικά της πόλης.

Όταν η ανάλυση βασίζεται σε μετρήσεις της θερμοκρασίας του αέρα, η ένταση της αστικής θερμικής νησίδας μπορεί να εκφραστεί ως:

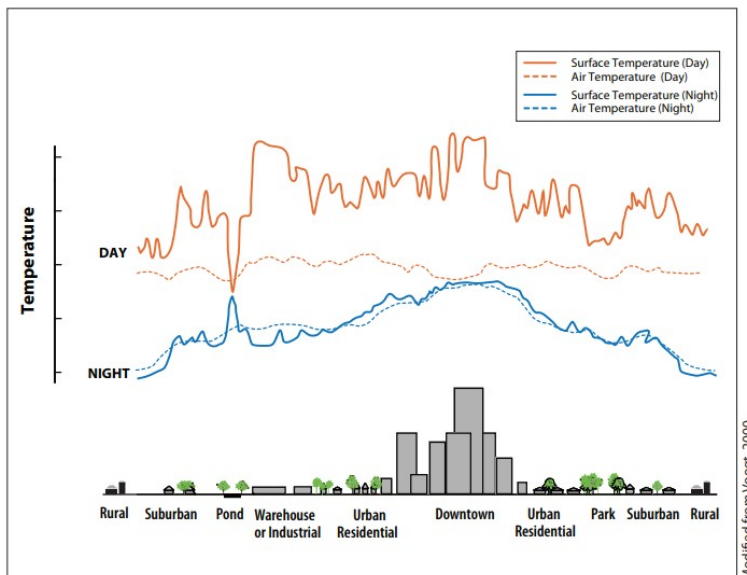
$$\Delta T_{u-r} = T_u - T_r$$

όπου

- T_u είναι η θερμοκρασία στην αστική περιοχή,
- T_r η θερμοκρασία στην περιοχή αναφοράς.

Θετική τιμή της ΔT_{u-r} υποδηλώνει ότι η αστική περιοχή είναι θερμότερη από την περιοχή αναφοράς. Η επιλογή της περιοχής αναφοράς είναι κρίσιμη, καθώς οι δύο θέσεις πρέπει να είναι όσο το δυνατόν περισσότερο συγκρίσιμες ως προς το υψόμετρο, την απόσταση από τη θάλασσα, την έκθεση στους ανέμους και την ευρύτερη τοπογραφία. Η δημιουργία της αστικής θερμικής νησίδας συνδέεται με τη μεταβολή του φυσικού ενεργειακού ισοζυγίου λόγω της αστικοποίησης. Η αντικατάσταση της βλάστησης και του φυσικού εδάφους από ασφαλτο, σκυρόδεμα και άλλες αδιαπέρατες επιφάνειες περιορίζει την εξατμισοδιαπνοή και αυξάνει την αποθήκευση θερμότητας. Παράλληλα, η πυκνή δόμηση, ο μειωμένος συντελεστής θέσης του ουρανού και οι ανταλλαγές ακτινοβολίας μεταξύ των αστικών επιφανειών περιορίζουν την απώλεια ενέργειας προς τον ουρανό, ενώ η ανθρωπογενής θερμότητα από την κυκλοφορία, τη θέρμανση, τον κλιματισμό και άλλες δραστηριότητες ενισχύει το τοπικό θερμικό φορτίο. Η αστική θερμική νησίδα του αέρα είναι συχνά εντονότερη κατά τις νυχτερινές ώρες. Μετά τη δύση του ήλιου, οι φυσικές και φυτεμένες επιφάνειες των λιγότερο δομημένων περιοχών ψύχονται συνήθως ταχύτερα, ενώ τα αστικά υλικά εξακολουθούν να αποδίδουν τη θερμότητα που αποθήκευσαν κατά τη διάρκεια της ημέρας. Η ένταση του φαινομένου είναι συνήθως μεγαλύτερη σε αίθριες και ασθενώς ανεμώδεις νύχτες, ενώ περιορίζεται υπό συνθήκες ισχυρού ανέμου ή αυξημένης

νεφοκάλυψης. Η τυπική χωρική μεταβολή της θερμοκρασίας από τις λιγότερο δομημένες ζώνες προς το πυκνοδομημένο αστικό κέντρο παρουσιάζεται στο Σχήμα 2.1.



Σχήμα 2.1 Σχηματική αναπαράσταση της αστικής θερμικής νησίδας και της χωρικής μεταβολής της θερμοκρασίας σε διαφορετικούς τύπους χρήσεων γης.

Πηγή: [Modified from Voogt \(2000\), reproduced by the U.S. Environmental Protection Agency \(EPA\).](#)

Η αστική θερμική νησίδα συνδέεται με την ποιότητα του αέρα μέσω σύνθετων μηχανισμών. Οι υψηλότερες θερμοκρασίες μπορεί να συνυπάρχουν με αυξημένη φωτοχημική δραστηριότητα και να ευνοούν, παρουσία ηλιακής ακτινοβολίας και κατάλληλων πρόδρομων ενώσεων, την παραγωγή τροποσφαιρικού O_3 . Παράλληλα, η αυξημένη χρήση κλιματισμού ενισχύει την ενεργειακή κατανάλωση και μπορεί, ανάλογα με το ενεργειακό μίγμα, να συνδέεται με πρόσθετες εκπομπές ρύπων. Η επίδραση στη διασπορά δεν είναι μονοσήμαντη, καθώς η αστική θέρμανση μπορεί υπό ορισμένες συνθήκες να ενισχύει την κατακόρυφη ανάμιξη, ενώ υπό άλλες να συνυπάρχει με ατμοσφαιρική στασιμότητα.

Στο λεκανοπέδιο της Αθήνας, η αστική θερμική νησίδα παρουσιάζει ιδιαίτερο ενδιαφέρον λόγω της πυκνής δόμησης, της εκτεταμένης κάλυψης από αδιαπέρατες επιφάνειες, της περιορισμένης παρουσίας πρασίνου σε αρκετές κεντρικές περιοχές και της έντονης ανθρωπογενούς δραστηριότητας. Οι θερμοκρασιακές διαφορές μεταξύ κεντρικών, προαστιακών και περιαστικών θέσεων επηρεάζονται, ωστόσο, και από το υψόμετρο, την

τοπογραφία, την απόσταση από τη θάλασσα και την έκθεση στα τοπικά συστήματα ατμοσφαιρικής κυκλοφορίας. Η αστική θερμική νησίδα αποτελεί, επομένως, χρήσιμο θεωρητικό πλαίσιο για την ερμηνεία των διαφορών στις στατιστικές σχέσεις μεταξύ θερμοκρασίας και συγκεντρώσεων ατμοσφαιρικών ρύπων. Δεν υπολογίζεται, ωστόσο, αυτοτελώς στην παρούσα ανάλυση, καθώς ένας τέτοιος υπολογισμός απαιτεί προσεκτικά επιλεγμένη και επαρκώς συγκρίσιμη περιοχή αναφοράς.

2.2.5 Κλιματική αλλαγή και μεταβολή των θερμοκρασιακών συνθηκών

Η κλιματική αλλαγή διαμορφώνει ένα μεταβαλλόμενο θερμοκρασιακό υπόβαθρο για τις αστικές περιοχές, το οποίο χαρακτηρίζεται από άνοδο της μέσης θερμοκρασίας και μεταβολές στη συχνότητα, στην ένταση και στη διάρκεια των ακραίων θερμικών επεισοδίων. Οι μεταβολές αυτές μπορούν να εντείνουν τις ήδη υφιστάμενες θερμικές πιέσεις στις πόλεις, όπου η πυκνή δόμηση, οι αδιαπέρατες επιφάνειες, η περιορισμένη παρουσία βλάστησης και οι ανθρωπογενείς εκλύσεις θερμότητας συμβάλλουν στη διαμόρφωση υψηλότερων θερμοκρασιών.

Ιδιαίτερη σημασία παρουσιάζει η αύξηση της συχνότητας και της διάρκειας των καυσόνων. Τα παρατεταμένα επεισόδια υψηλών θερμοκρασιών αυξάνουν τη θερμική καταπόνηση, ενισχύουν τη ζήτηση ενέργειας για ψύξη και μπορούν να επιβαρύνουν περαιτέρω το αστικό περιβάλλον μέσω της απόρριψης θερμότητας από τα συστήματα κλιματισμού. Η διατήρηση υψηλών θερμοκρασιών κατά τη διάρκεια της νύχτας είναι ιδιαίτερα επιβαρυντική, επειδή περιορίζει τη δυνατότητα θερμικής ανακούφισης του πληθυσμού. Οι μεταβολές των θερμοκρασιακών συνθηκών συνδέονται και με την ποιότητα του αέρα. Οι υψηλότερες θερμοκρασίες, όταν συνυπάρχουν με έντονη ηλιακή ακτινοβολία και επαρκείς συγκεντρώσεις πρόδρομων ενώσεων, μπορούν να ευνοούν τις φωτοχημικές διεργασίες σχηματισμού τροποσφαιρικού O_3 . Παράλληλα, οι θερμές και ξηρές περίοδοι μπορεί να αυξάνουν την ξηρότητα των επιφανειών και, υπό κατάλληλες ανεμολογικές συνθήκες, να ευνοούν την επαναιώρηση σκόνης και την αύξηση των συγκεντρώσεων PM_{10} . Η αύξηση της θερμοκρασίας και η συχνότερη εμφάνιση ξηρών συνθηκών μπορούν επίσης να ενισχύουν τον κίνδυνο δασικών πυρκαγιών, οι οποίες αποτελούν σημαντική πηγή αιωρούμενων σωματιδίων, CO , οξειδίων του αζώτου και πτητικών οργανικών ενώσεων.

Η κλιματική αλλαγή μπορεί επιπλέον να επηρεάζει τα πρότυπα ατμοσφαιρικής κυκλοφορίας, τη συχνότητα επεισοδίων στασιμότητας και τις συνθήκες μεταφοράς και διασποράς των ρύπων. Όταν οι υψηλές θερμοκρασίες συνυπάρχουν με ασθενείς ανέμους, περιορισμένη νεφοκάλυψη και παρατεταμένη ατμοσφαιρική σταθερότητα, μπορεί να δημιουργούνται ευνοϊκές συνθήκες είτε για τη συσσώρευση πρωτογενών ρύπων είτε για την ενίσχυση της φωτοχημικής ρύπανσης.

Στο λεκανοπέδιο της Αθήνας, οι μεταβολές αυτές αποκτούν ιδιαίτερη σημασία λόγω του μεσογειακού κλίματος, της υψηλής θερινής ηλιοφάνειας, της πυκνής δόμησης, της εκτεταμένης παρουσίας αδιαπέρατων επιφανειών και της περιορισμένης βλάστησης σε αρκετές κεντρικές περιοχές. Η συχνότερη ή παρατεταμένη εμφάνιση θερμών επεισοδίων μπορεί να αυξάνει τη συνολική θερμική επιβάρυνση και, όταν συνυπάρχουν ευνοϊκές φωτοχημικές συνθήκες, να συνδέεται με αυξημένα επίπεδα τροποσφαιρικού όζοντος κατά τη θερινή περίοδο. Η σχέση μεταξύ κλιματικής αλλαγής και ατμοσφαιρικής ρύπανσης δεν είναι απλή ούτε μονοσήμαντη. Διαμορφώνεται από την αλληλεπίδραση των μετεωρολογικών μεταβολών με τις ανθρωπογενείς εκπομπές, την ενεργειακή κατανάλωση, τις χρήσεις γης, τη συχνότητα των δασικών πυρκαγιών και τις πολιτικές περιορισμού των ρύπων. Επομένως, η μελλοντική εξέλιξη των συγκεντρώσεων δεν καθορίζεται μόνο από την αύξηση της θερμοκρασίας, αλλά και από τις μεταβολές στις εκπομπές και στις κοινωνικοοικονομικές δραστηριότητες.

Για την παρούσα εργασία, η κλιματική αλλαγή αποτελεί το ευρύτερο θεωρητικό πλαίσιο μέσα στο οποίο εξετάζεται η σχέση μεταξύ θερμοκρασίας και ατμοσφαιρικών ρύπων. Η ανάλυση επικεντρώνεται στην περίοδο 2016–2024 και δεν αποσκοπεί στην ανίχνευση ή στην απόδοση μακροχρόνιων κλιματικών τάσεων. Η διερεύνηση των ημερήσιων και εποχικών σχέσεων αποτυπώνει τις στατιστικές συνδέσεις που εμφανίζονται κατά την εξεταζόμενη περίοδο και συμβάλλει στην κατανόηση του τρόπου με τον οποίο οι μεταβολές των θερμοκρασιακών συνθηκών συνυπάρχουν με τις μεταβολές της ποιότητας του αέρα.

2.3 Μηχανισμοί επίδρασης της θερμοκρασίας στους ατμοσφαιρικούς ρύπους

Η θερμοκρασία αποτελεί μία από τις βασικές μετεωρολογικές παραμέτρους που συνδέονται με τη συμπεριφορά των ατμοσφαιρικών ρύπων. Η επίδρασή της δεν είναι ενιαία για όλους τους ρύπους, αλλά εξαρτάται από τις πηγές εκπομπής, τις φυσικοχημικές ιδιότητες, τους μηχανισμούς σχηματισμού και απομάκρυνσης, καθώς και από τις υπόλοιπες ατμοσφαιρικές συνθήκες. Ένας βασικός μηχανισμός αφορά την επίδραση της θερμοκρασίας στους ρυθμούς χημικών και φωτοχημικών αντιδράσεων. Οι υψηλότερες θερμοκρασίες μπορούν να επιταχύνουν ορισμένες αντιδράσεις και να ενισχύσουν τη φωτοχημική δραστηριότητα, ιδιαίτερα όταν συνυπάρχουν αυξημένη ηλιακή ακτινοβολία και επαρκείς συγκεντρώσεις πρόδρομων ενώσεων. Η σχέση αυτή είναι ιδιαίτερα σημαντική για δευτερογενείς ρύπους, όπως το τροποσφαιρικό O_3 και ορισμένα συστατικά των αιωρούμενων σωματιδίων.

Η θερμοκρασία συνδέεται επίσης με τη θερμική δομή και τη σταθερότητα της κατώτερης ατμόσφαιρας. Η ισχυρή θέρμανση της επιφάνειας μπορεί να ενισχύσει την κατακόρυφη ανάμιξη και να επιτρέψει την κατανομή των ρύπων σε μεγαλύτερο όγκο αέρα. Αντίθετα, σε συνθήκες ατμοσφαιρικής σταθερότητας ή θερμοκρασιακής αναστροφής, η κατακόρυφη μεταφορά περιορίζεται και οι ρύποι μπορεί να συσσωρεύονται κοντά στην επιφάνεια. Η ανάπτυξη του ατμοσφαιρικού οριακού στρώματος εξαρτάται, ωστόσο, από τη συνδυασμένη επίδραση της επιφανειακής θέρμανσης, της ακτινοβολίας, του ανέμου, της νεφοκάλυψης και της συνοπτικής κυκλοφορίας. Η θερμοκρασία μπορεί ακόμη να συνδέεται με μεταβολές στις ανθρωπογενείς, φυσικές και βιογενείς εκπομπές. Κατά τις ψυχρότερες περιόδους, η αυξημένη χρήση θέρμανσης μπορεί να ενισχύει τις εκπομπές NO_x , CO , αιωρούμενων σωματιδίων και, ανάλογα με το καύσιμο, SO_2 . Αντίθετα, κατά τις θερμές περιόδους αυξάνεται η ζήτηση ηλεκτρικής ενέργειας για ψύξη, ενώ οι υψηλότερες θερμοκρασίες μπορούν να ενισχύουν και τις εκπομπές βιογενών πτητικών οργανικών ενώσεων από τη βλάστηση. Οι ενώσεις αυτές, παρουσία NO_x και ηλιακής ακτινοβολίας, συμμετέχουν στις φωτοχημικές διεργασίες παραγωγής O_3 και δευτερογενών οργανικών αερολυμάτων.

Σημαντική είναι επίσης η επίδραση της θερμοκρασίας στη συμπεριφορά των αιωρούμενων σωματιδίων. Οι θερμές και ξηρές περίοδοι μπορούν να ευνοούν την επαναιώρηση εδαφικής και οδικής σκόνης, ενώ η θερμοκρασία επηρεάζει και την κατανομή ορισμένων ημιπτητικών ενώσεων μεταξύ αέριας και σωματιδιακής φάσης. Σε χαμηλότερες θερμοκρασίες ευνοείται η παρουσία ορισμένων ενώσεων στη σωματιδιακή φάση, ενώ σε υψηλότερες θερμοκρασίες μπορεί να ενισχύεται η εξάτμιση και η μεταφορά τους προς την

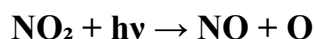
αέρια φάση. Η θερμοκρασία δεν δρα ανεξάρτητα από τις υπόλοιπες μετεωρολογικές μεταβλητές. Συχνά μεταβάλλεται ταυτόχρονα με την ηλιακή ακτινοβολία, τη σχετική υγρασία, τη νεφοκάλυψη, την ταχύτητα και τη διεύθυνση του ανέμου και το ύψος του ατμοσφαιρικού οριακού στρώματος. Επομένως, μία στατιστική σχέση μεταξύ θερμοκρασίας και συγκέντρωσης ενός ρύπου δεν πρέπει να ερμηνεύεται αυτομάτως ως απόδειξη άμεσης και μεμονωμένης αιτιώδους επίδρασης της θερμοκρασίας, αλλά ως ένδειξη συνδυασμένης επίδρασης μετεωρολογικών, χημικών και ανθρωπογενών παραγόντων. Η κατεύθυνση και η ένταση της σχέσης μπορεί να διαφοροποιούνται ανά εποχή, ρύπο και τύπο σταθμού. Σε έναν σταθμό κυκλοφοριακής επιβάρυνσης μπορεί να κυριαρχούν οι άμεσες εκπομπές και οι τοπικές συνθήκες αερισμού, ενώ σε προαστιακούς ή περιφερειακούς σταθμούς μπορεί να αποκτούν μεγαλύτερη σημασία η περιφερειακή μεταφορά και οι φωτοχημικές διεργασίες. Αντίστοιχα, κατά τον χειμώνα μπορεί να είναι εντονότερη η συμβολή της θέρμανσης και των σταθερών ατμοσφαιρικών συνθηκών, ενώ κατά τη θερμή περίοδο αποκτούν μεγαλύτερη σημασία η φωτοχημεία, οι βιογενείς εκπομπές και η κατακόρυφη ανάμιξη.

Στις επόμενες υποενότητες εξετάζονται συνοπτικά οι βασικοί μηχανισμοί μέσω των οποίων η θερμοκρασία συνδέεται με τις συγκεντρώσεις των ατμοσφαιρικών ρύπων: οι χημικές και φωτοχημικές αντιδράσεις, η ατμοσφαιρική διασπορά, οι μεταβολές στις εκπομπές και ο σχηματισμός δευτερογενών αερολυμάτων.

2.3.1 Επίδραση της θερμοκρασίας στις φωτοχημικές αντιδράσεις

Η θερμοκρασία συνδέεται με τους ρυθμούς πολλών χημικών και φωτοχημικών διεργασιών που πραγματοποιούνται στην ατμόσφαιρα. Η σημασία της είναι ιδιαίτερα εμφανής κατά τις θερμές και ηλιόλουστες περιόδους, όταν οι υψηλές θερμοκρασίες συνυπάρχουν συχνά με έντονη ηλιακή ακτινοβολία και περιορισμένη νεφοκάλυψη. Οι συνθήκες αυτές μπορούν να ευνοούν τον σχηματισμό δευτερογενών ρύπων, με χαρακτηριστικότερο παράδειγμα το τροποσφαιρικό όζον.

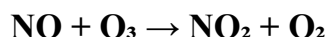
Ο βασικός φωτοχημικός κύκλος σχηματισμού και κατανάλωσης του O_3 αρχίζει με τη φωτοδιάσπαση του NO_2 υπό την επίδραση της ηλιακής ακτινοβολίας:



Το παραγόμενο ατομικό οξυγόνο αντιδρά στη συνέχεια με το μοριακό οξυγόνο, παρουσία τρίτου μορίου, σχηματίζοντας όζον:



Το O_3 μπορεί κατόπιν να καταναλωθεί μέσω της αντίδρασής του με το NO :



Οι αντιδράσεις αυτές συγκροτούν τον βασικό φωτοχημικό κύκλο μεταξύ NO , NO_2 και O_3 . Σε ένα απλοποιημένο σύστημα, χωρίς τη συμμετοχή άλλων δραστικών ενώσεων, ο κύκλος τείνει προς φωτοστατική ισορροπία και δεν οδηγεί σε καθαρή συσσώρευση O_3 .

Η καθαρή παραγωγή όζοντος ενισχύεται όταν στην ατμόσφαιρα υπάρχουν πτητικές οργανικές ενώσεις και μονοξείδιο του άνθρακα. Κατά την οξείδωσή τους σχηματίζονται υπεροξυρίζες, όπως οι HO_2 και RO_2 , οι οποίες μπορούν να οξειδώσουν το NO προς NO_2 χωρίς την ταυτόχρονη κατανάλωση O_3 . Η φωτοδιάσπαση του πρόσθετου NO_2 επιτρέπει έτσι την περαιτέρω παραγωγή όζοντος. Η θερμοκρασία δεν αποτελεί τον άμεσο παράγοντα της φωτοδιάσπασης του NO_2 , η οποία εξαρτάται κυρίως από την ηλιακή ακτινοβολία. Μπορεί, ωστόσο, να επηρεάζει τους ρυθμούς άλλων θερμικά εξαρτώμενων αντιδράσεων, τις εκπομπές πρόδρομων ενώσεων, τη διάρκεια ζωής ορισμένων χημικών ειδών και τη συνολική οξειδωτική ικανότητα της ατμόσφαιρας. Επομένως, η συμβολή της στη φωτοχημεία εκδηλώνεται μέσω άμεσων και έμμεσων μηχανισμών.

Ιδιαίτερη σημασία έχει η εξάρτηση των βιογενών εκπομπών πτητικών οργανικών ενώσεων από τη θερμοκρασία. Κατά τις θερμές ημέρες μπορεί να αυξάνονται οι εκπομπές ενώσεων, όπως το ισοπρένιο και ορισμένα τερπένια, από τη βλάστηση. Παρουσία επαρκών συγκεντρώσεων NO_x , η οξείδωση των ενώσεων αυτών μπορεί να συμβάλλει στην παραγωγή O_3 . Παράλληλα, οι υψηλότερες θερμοκρασίες μπορούν να αυξάνουν την πτητικότητα και την εξάτμιση οργανικών ενώσεων από καύσιμα, διαλύτες και άλλες ανθρωπογενείς πηγές.

Για τους λόγους αυτούς, παρατηρούνται συχνά θετικές στατιστικές σχέσεις μεταξύ θερμοκρασίας και συγκεντρώσεων O_3 . Οι σχέσεις αυτές αντανakλούν τη συνδυασμένη επίδραση της ηλιακής ακτινοβολίας, της διαθεσιμότητας πρόδρομων ενώσεων, της χημικής σύστασης των αέριων μαζών και των συνθηκών μεταφοράς και παραμονής τους. Συνεπώς, δεν πρέπει να αποδίδονται αποκλειστικά στη θερμοκρασία.

Η φωτοχημική συμπεριφορά του O_3 παρουσιάζει σημαντική χωρική διαφοροποίηση. Κοντά σε έντονες κυκλοφοριακές πηγές, οι αυξημένες συγκεντρώσεις NO μπορεί να μειώνουν το O_3 μέσω τιτλοδότησης. Αντίθετα, καθώς οι αέριες μάζες απομακρύνονται από τις άμεσες πηγές και οι φωτοχημικές διεργασίες συνεχίζονται, είναι δυνατό να εμφανίζονται υψηλότερες συγκεντρώσεις O_3 σε προαστιακές, περιαστικές ή κατάντη περιοχές.

Οι φωτοχημικές και οξειδωτικές διεργασίες επηρεάζουν και άλλους ρύπους. Η μετατροπή του NO σε NO_2 , η φωτοδιάσπαση του NO_2 και οι αντιδράσεις τους με οξειδωτικά είδη συμβάλλουν στη χρονική και χωρική μεταβλητότητα των οξειδίων του αζώτου. Παράλληλα, η οξείδωση του SO_2 , των NO_x και των πτητικών οργανικών ενώσεων μπορεί να οδηγήσει στον σχηματισμό δευτερογενών θεικών, νιτρικών και οργανικών σωματιδίων. Η σχέση μεταξύ θερμοκρασίας και φωτοχημικής ρύπανσης δεν είναι κατ' ανάγκη γραμμική. Σε πολύ υψηλές θερμοκρασίες μπορεί να μεταβάλλονται οι εκπομπές πρόδρομων ενώσεων, η υδατική κατάσταση της βλάστησης, η ατμοσφαιρική κυκλοφορία και οι συνθήκες διασποράς. Επιπλέον, ο ισχυρός άνεμος ή η έντονη κατακόρυφη ανάμιξη μπορεί να περιορίζουν τη συσσώρευση φωτοχημικών προϊόντων, ακόμη και όταν η θερμοκρασία και η ηλιακή ακτινοβολία είναι υψηλές.

Στο λεκανοπέδιο της Αθήνας, οι θερμές, ξηρές και ηλιόλουστες συνθήκες της θερινής περιόδου δημιουργούν συχνά ευνοϊκό περιβάλλον για την ανάπτυξη φωτοχημικών διεργασιών. Οι εκπομπές NO_x και πτητικών οργανικών ενώσεων, σε συνδυασμό με τη θαλάσσια αύρα, την τοπογραφία του λεκανοπεδίου και τη μεταφορά αέριων μαζών προς προαστιακές και περιαστικές περιοχές, μπορούν να συμβάλλουν στη χωρική διαφοροποίηση των συγκεντρώσεων O_3 . Η κατανόηση των φωτοχημικών μηχανισμών είναι απαραίτητη για την ερμηνεία των αποτελεσμάτων της παρούσας εργασίας. Οι στατιστικές σχέσεις της θερμοκρασίας με το O_3 , το NO και το NO_2 μπορεί να αντανakλούν τη συνδυασμένη επίδραση φωτοχημικών μετασχηματισμών, μεταβολών στις εκπομπές, κατακόρυφης ανάμιξης, μεταφοράς και εποχικής συνδιακύμανσης άλλων μετεωρολογικών παραμέτρων και δεν τεκμηριώνουν από μόνες τους άμεση αιτιώδη επίδραση της θερμοκρασίας.

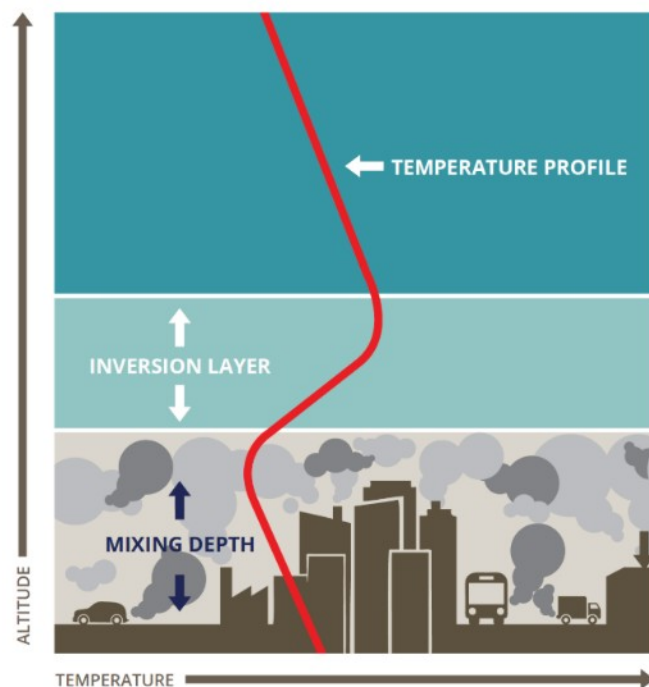
2.3.2 Επίδραση της θερμοκρασίας στην ατμοσφαιρική διασπορά

Η ατμοσφαιρική διασπορά καθορίζει τον τρόπο με τον οποίο οι ρύποι μεταφέρονται, αραιώνονται και κατανέμονται στον οριζόντιο και κατακόρυφο χώρο. Η αποτελεσματικότητά της εξαρτάται από την ταχύτητα και τη διεύθυνση του ανέμου, την ατμοσφαιρική σταθερότητα, την κατακόρυφη θερμοκρασιακή δομή, την ένταση της τύρβης και το ύψος του ατμοσφαιρικού οριακού στρώματος. Η θερμοκρασία συνδέεται με τις διεργασίες αυτές κυρίως μέσω της επιφανειακής θέρμανσης και ψύξης και της διαμόρφωσης της θερμικής δομής της κατώτερης ατμόσφαιρας.

Κατά τη διάρκεια της ημέρας, η απορρόφηση της ηλιακής ακτινοβολίας θερμαίνει την επιφάνεια και τον αέρα κοντά στο έδαφος. Όταν η επιφανειακή θέρμανση είναι επαρκής, δημιουργούνται συνθήκες θετικής άνωσης, αναπτύσσονται ανοδικές κινήσεις και ενισχύεται η θερμική τύρβη. Η κατακόρυφη ανάμιξη επιτρέπει στους ρύπους να κατανέμονται σε μεγαλύτερο όγκο αέρα, με αποτέλεσμα οι συγκεντρώσεις πρωτογενών ρύπων κοντά στην επιφάνεια να τείνουν συχνά να μειώνονται. Η κατακόρυφη ανάμιξη συνδέεται με την εξέλιξη του ατμοσφαιρικού οριακού στρώματος, δηλαδή του κατώτερου τμήματος της τροπόσφαιρας που ανταποκρίνεται άμεσα στις επιδράσεις της επιφάνειας. Κατά τις θερμές και ηλιόλουστες ώρες μπορεί να αναπτύσσεται βαθύτερο και περισσότερο ασταθές οριακό στρώμα, μέσα στο οποίο οι εκπεμπόμενοι ρύποι διασπείρονται σε μεγαλύτερο κατακόρυφο εύρος. Το ύψος του οριακού στρώματος δεν καθορίζεται μόνο από τη θερμοκρασία, αλλά και από την επιφανειακή ροή θερμότητας, την ηλιακή ακτινοβολία, τον άνεμο, τη νεφοκάλυψη, την υγρασία, την τοπογραφία και τη συνοπτική κατάσταση.

Κατά τη διάρκεια της νύχτας, η επιφάνεια χάνει ενέργεια μέσω ακτινοβολίας και ψύχεται. Ο αέρας κοντά στο έδαφος μπορεί τότε να γίνει ψυχρότερος από τον υπερκείμενο αέρα, δημιουργώντας σταθερή κατακόρυφη στρωμάτωση. Υπό αυτές τις συνθήκες, η θερμική τύρβη περιορίζεται και η μειωμένη ανάμιξη μπορεί να ευνοεί τη συσσώρευση πρωτογενών ρύπων κοντά στην επιφάνεια, ιδιαίτερα όταν οι εκπομπές συνεχίζονται και οι άνεμοι είναι ασθενείς. Ιδιαίτερη περίπτωση σταθερής στρωμάτωσης αποτελεί η θερμοκρασιακή αναστροφή. Κατά τη διάρκεια μιας αναστροφής, θερμότερος αέρας βρίσκεται πάνω από ψυχρότερο αέρα, με αποτέλεσμα να καταστέλλονται οι κατακόρυφες κινήσεις και να περιορίζεται το διαθέσιμο ύψος ανάμιξης. Εάν οι εκπομπές συνεχίζονται και δεν υπάρχει επαρκής οριζόντια μεταφορά από τον άνεμο, οι συγκεντρώσεις των ρύπων μπορεί να αυξηθούν σημαντικά κοντά στην επιφάνεια.

Η κατακόρυφη θερμοκρασιακή δομή κατά τη διάρκεια θερμοκρασιακής αναστροφής και ο περιορισμός της διασποράς παρουσιάζονται στο Σχήμα 2.2



Σχήμα 2.2 Σχηματική αναπαράσταση θερμοκρασιακής αναστροφής και περιορισμού της κατακόρυφης διασποράς των ατμοσφαιρικών ρύπων.

Πηγή: [European Environment Agency \(2016\), Temperature inversion traps pollution at ground level.](#)

Οι θερμικές διαφορές μεταξύ γειτονικών επιφανειών μπορούν επίσης να δημιουργούν τοπικά συστήματα κυκλοφορίας. Στις παράκτιες περιοχές, η διαφορετική θερμική απόκριση της ξηράς και της θάλασσας οδηγεί στην ανάπτυξη θαλάσσιας και απόγειας αύρας. Η θαλάσσια αύρα μπορεί να βελτιώνει τον αερισμό ορισμένων περιοχών, αλλά σε σύνθετες τοπογραφικές συνθήκες μπορεί επίσης να μεταφέρει ρύπους και πρόδρομες ενώσεις προς το εσωτερικό, συμβάλλοντας στη χωρική διαφοροποίηση των συγκεντρώσεων και, υπό κατάλληλες συνθήκες, στη φωτοχημική παραγωγή O_3 . Η σύνδεση της θερμοκρασίας με τη διασπορά μπορεί να συνοδεύεται από διαφορετικές μεταβολές στις συγκεντρώσεις των επιμέρους ρύπων. Μια θερμή και ηλιόλουστη ημέρα μπορεί να χαρακτηρίζεται από βαθύτερο οριακό στρώμα και εντονότερη κατακόρυφη ανάμιξη, περιορίζοντας τις

συγκεντρώσεις ορισμένων πρωτογενών ρύπων κοντά στην επιφάνεια. Ταυτόχρονα, όμως, οι ίδιες συνθήκες μπορεί να ευνοούν τη φωτοχημική παραγωγή και τη συσσώρευση O_3 .

Στις αστικές περιοχές, η γεωμετρία των κτιρίων μπορεί να τροποποιεί τη σύνδεση μεταξύ των συνθηκών του ευρύτερου οριακού στρώματος και της διασποράς στο επίπεδο του δρόμου. Στενοί δρόμοι, υψηλά κτίρια και συνεχείς οικοδομικές γραμμές μπορούν να δημιουργούν ζώνες ανακυκλοφορίας και περιορισμένου αερισμού, με αποτέλεσμα οι ρύποι να εμφανίζουν αυξημένες συγκεντρώσεις σε συγκεκριμένα σημεία.

Στο λεκανοπέδιο της Αθήνας, η γεωμορφολογία, η γειτνίαση με τον Σαρωνικό Κόλπο και οι ορεινοί όγκοι που περιβάλλουν μεγάλο μέρος της περιοχής δημιουργούν σύνθετες συνθήκες μεταφοράς και διασποράς. Σε περιόδους ασθενών ανέμων και ατμοσφαιρικής σταθερότητας μπορεί να περιορίζεται ο αερισμός και να ευνοείται η συσσώρευση ρύπων. Υπό άλλες συνθήκες, η θαλάσσια αύρα μπορεί να μεταφέρει ρύπους και πρόδρομες ενώσεις από τις παράκτιες και κεντρικές περιοχές προς το εσωτερικό, συμβάλλοντας στη διαφοροποίηση των συγκεντρώσεων μεταξύ αστικών, προαστιακών και περιαστικών σταθμών.

Η κατανόηση των μηχανισμών αυτών είναι κρίσιμη για την ερμηνεία των αποτελεσμάτων της παρούσας εργασίας. Οι στατιστικές σχέσεις μεταξύ θερμοκρασίας και πρωτογενών ρύπων μπορεί να αντανakλούν μεταβολές στην κατακόρυφη ανάμιξη, αλλά και εποχικές διαφοροποιήσεις στις εκπομπές, στον άνεμο, στη βροχόπτωση και σε άλλες μετεωρολογικές παραμέτρους. Συνεπώς, οι συσχετίσεις αυτές δεν τεκμηριώνουν από μόνες τους τη δράση ενός μοναδικού μηχανισμού.

2.3.3 Επίδραση της θερμοκρασίας στις εκπομπές ατμοσφαιρικών ρύπων

Η θερμοκρασία μπορεί να συνδέεται με τις συγκεντρώσεις των ατμοσφαιρικών ρύπων όχι μόνο μέσω των χημικών μετασχηματισμών και των συνθηκών διασποράς, αλλά και μέσω μεταβολών στην ένταση και στη χρονική κατανομή των εκπομπών. Η σύνδεση αυτή αφορά ανθρωπογενείς, φυσικές και βιογενείς πηγές, εκδηλώνεται συχνά έμμεσα μέσω της ενεργειακής ζήτησης και των ανθρώπινων δραστηριοτήτων και παρουσιάζει έντονη ημερήσια και εποχική διαφοροποίηση.

Κατά τις ψυχρότερες περιόδους, η αυξημένη χρήση συστημάτων θέρμανσης οδηγεί σε μεγαλύτερη κατανάλωση ενέργειας και καυσίμων και μπορεί να ενισχύει τις εκπομπές NO_x ,

CO και αιωρούμενων σωματιδίων. Ανάλογα με το είδος και την περιεκτικότητα του χρησιμοποιούμενου καυσίμου σε θείο, μπορεί επίσης να αυξάνονται οι εκπομπές SO₂. Η καύση ξύλου και άλλων μορφών βιομάζας μπορεί να αποτελεί σημαντική πηγή σωματιδιακής ρύπανσης κατά τη χειμερινή περίοδο, ιδιαίτερα όταν συνδυάζεται με συνθήκες ασθενούς αερισμού, ρηχό ατμοσφαιρικό οριακό στρώμα ή θερμοκρασιακές αναστροφές.

Η εξωτερική θερμοκρασία επηρεάζει επίσης τις εκπομπές από την οδική κυκλοφορία. Σε χαμηλές θερμοκρασίες, η ψυχρή εκκίνηση των κινητήρων μπορεί να συνοδεύεται από αυξημένες εκπομπές CO, υδρογονανθράκων και άλλων προϊόντων ατελούς καύσης, έως ότου ο κινητήρας και τα συστήματα μετεπεξεργασίας των καυσαερίων φθάσουν στην κατάλληλη θερμοκρασία λειτουργίας. Παράλληλα, η κυκλοφοριακή συμφόρηση, η παρατεταμένη λειτουργία στο ρελαντί και οι συχνές επιταχύνσεις και επιβραδύνσεις μπορούν να αυξάνουν την κατανάλωση καυσίμου και τις εκπομπές, χωρίς όμως να καθορίζονται αποκλειστικά από τη θερμοκρασία.

Κατά τις θερμές περιόδους, η αυξημένη χρήση συστημάτων κλιματισμού οδηγεί συνήθως σε μεγαλύτερη ζήτηση ηλεκτρικής ενέργειας. Ανάλογα με το ενεργειακό μίγμα και την τεχνολογία παραγωγής, η πρόσθετη ηλεκτροπαραγωγή μπορεί να συνδέεται με εκπομπές NO_x, SO₂, αιωρούμενων σωματιδίων και αερίων του θερμοκηπίου. Οι εκπομπές αυτές δεν εμφανίζονται αναγκαστικά στην περιοχή κατανάλωσης της ενέργειας, αλλά μπορεί να εκλύονται σε απομακρυσμένες εγκαταστάσεις ηλεκτροπαραγωγής. Επομένως, πρέπει να διακρίνεται η τοπική θερμική επιβάρυνση από τη λειτουργία των κλιματιστικών από τις έμμεσες εκπομπές που σχετίζονται με την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας.

Οι υψηλότερες θερμοκρασίες μπορούν επίσης να ενισχύουν τις εξατμιστικές και βιογενείς εκπομπές πτητικών οργανικών ενώσεων. Η αύξηση της θερμοκρασίας αυξάνει την τάση ατμών πολλών πτητικών ουσιών και μπορεί να ευνοεί τη μετάβασή τους στην αέρια φάση. Παράλληλα, η βλάστηση εκπέμπει πτητικές οργανικές ενώσεις, όπως ισοπρένιο και τερπένια, των οποίων οι ρυθμοί εκπομπής συχνά αυξάνονται με τη θερμοκρασία και την ηλιακή ακτινοβολία. Σε ατμοσφαιρικό περιβάλλον με κατάλληλες συγκεντρώσεις NO_x, οι ενώσεις αυτές μπορούν να συμμετέχουν στη φωτοχημική παραγωγή O₃ και δευτερογενών οργανικών αερολυμάτων.

Οι θερμές και ξηρές συνθήκες μπορούν επιπλέον να ευνοούν την επαναιώρηση σωματιδιακού υλικού. Η ξηρότητα του εδάφους και του οδοστρώματος αυξάνει τη

διαθεσιμότητα χαλαρής σκόνης, η οποία μπορεί να επανεισαχθεί στην ατμόσφαιρα εξαιτίας του ανέμου, της κίνησης των οχημάτων και άλλων μηχανικών διαταραχών. Παράλληλα, η περιορισμένη βροχόπτωση μειώνει την υγρή απομάκρυνση των σωματιδίων και μπορεί να αυξάνει την ποσότητα της διαθέσιμης σκόνης.

Οι υψηλές θερμοκρασίες, η παρατεταμένη ξηρασία, η χαμηλή υγρασία της καύσιμης ύλης και οι κατάλληλες ανεμολογικές συνθήκες μπορούν ακόμη να αυξάνουν τον κίνδυνο εκδήλωσης και εξάπλωσης δασικών πυρκαγιών. Οι πυρκαγιές απελευθερώνουν σημαντικές ποσότητες PM₁₀, PM_{2.5}, CO, NO_x, πτητικών οργανικών ενώσεων και άλλων προϊόντων καύσης. Ο καπνός μπορεί να μεταφέρεται σε μεγάλες αποστάσεις και να αυξάνει τις συγκεντρώσεις ρύπων σε αστικές περιοχές μακριά από την εστία της πυρκαγιάς.

Η σύνδεση της θερμοκρασίας με τις εκπομπές δεν είναι γραμμική ούτε ίδια για όλους τους ρύπους. Οι χαμηλές θερμοκρασίες μπορεί να συνδέονται με αυξημένες εκπομπές από θέρμανση και ψυχρή εκκίνηση οχημάτων, ενώ οι υψηλές θερμοκρασίες μπορεί να συνδέονται με αυξημένη ενεργειακή ζήτηση για ψύξη, εντονότερες εξατμιστικές και βιογενείς εκπομπές, επαναιώρηση σκόνης ή αυξημένο κίνδυνο πυρκαγιών. Η κατεύθυνση και η ένταση της στατιστικής σχέσης μεταξύ θερμοκρασίας και συγκέντρωσης ενός ρύπου εξαρτώνται, επομένως, από τον μηχανισμό που υπερισχύει σε κάθε εποχή, θέση και τύπο σταθμού.

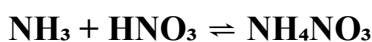
Στο λεκανοπέδιο της Αθήνας, η εποχική μεταβολή της ενεργειακής κατανάλωσης, η έντονη οδική κυκλοφορία, οι βιομηχανικές και λιμενικές δραστηριότητες και η συχνή εμφάνιση θερμών και ξηρών περιόδων συνθέτουν ένα σύνθετο πλαίσιο εκπομπών. Κατά τη χειμερινή περίοδο μπορεί να αποκτούν μεγαλύτερη σημασία οι εκπομπές από συστήματα θέρμανσης και καύση βιομάζας, ενώ κατά τη θερινή περίοδο μπορεί να ενισχύονται οι εξατμιστικές και βιογενείς εκπομπές, η ενεργειακή ζήτηση για ψύξη και η διαθεσιμότητα ξηρού σωματιδιακού υλικού.

Η κατανόηση των μηχανισμών αυτών είναι αναγκαία για την ερμηνεία των αποτελεσμάτων της παρούσας εργασίας. Οι στατιστικές σχέσεις μεταξύ θερμοκρασίας και συγκεντρώσεων των ρύπων μπορεί να αντανakλούν συνδυασμένη επίδραση μεταβολών στις εκπομπές, στη διασπορά, στη φωτοχημεία και στις συνθήκες απομάκρυνσης. Οι ερμηνείες αυτές περιγράφουν πιθανούς μηχανισμούς και δεν τεκμηριώνονται ως αποκλειστικές αιτίες μόνο από τη συσχέτιση της θερμοκρασίας με τις συγκεντρώσεις των ρύπων.

2.3.4 Επίδραση της θερμοκρασίας στον σχηματισμό δευτερογενών αερολυμάτων

Τα δευτερογενή αερολύματα δεν εκπέμπονται απευθείας στην ατμόσφαιρα, αλλά σχηματίζονται μέσω χημικών αντιδράσεων, οξείδωσης και μετατροπής αέριων πρόδρομων ενώσεων σε προϊόντα χαμηλότερης πτητικότητας. Στις βασικές κατηγορίες τους περιλαμβάνονται τα δευτερογενή ανόργανα αερολύματα, κυρίως θειικά, νιτρικά και αμμωνιακά ιόντα, καθώς και τα δευτερογενή οργανικά αερολύματα. Οι ενώσεις αυτές μπορούν να συμβάλλουν σημαντικά στη μάζα των αιωρούμενων σωματιδίων, ιδιαίτερα του λεπτόκοκκου κλάσματος PM_{2.5}, το οποίο περιλαμβάνεται και στο PM₁₀. Η θερμοκρασία επηρεάζει τόσο τους ρυθμούς των χημικών αντιδράσεων όσο και την κατανομή ημιπτητικών ενώσεων μεταξύ αέριας και σωματιδιακής φάσης. Για τον λόγο αυτό, η σχέση της με τις συγκεντρώσεις των αιωρούμενων σωματιδίων δεν είναι σταθερή ούτε μονοσήμαντη, αλλά εξαρτάται από τη χημική σύσταση της ατμόσφαιρας, τη σχετική υγρασία, τη διαθεσιμότητα πρόδρομων ενώσεων, την οξειδωτική ικανότητα και τις συνθήκες μεταφοράς, διασποράς και απομάκρυνσης. Ο σχηματισμός θεικών αερολυμάτων συνδέεται με την οξείδωση του SO₂ προς θεικό οξύ και άλλες θεικές ενώσεις. Το παραγόμενο θεικό οξύ έχει πολύ χαμηλή πτητικότητα και μπορεί να συμμετέχει στη δημιουργία νέων σωματιδίων ή να συμπυκνώνεται σε ήδη υπάρχοντα. Παρουσία αμμωνίας μπορεί επίσης να σχηματίζει θειικά άλατα αμμωνίου. Οι υψηλότερες θερμοκρασίες και η έντονη ηλιακή ακτινοβολία μπορούν να συνδέονται με αυξημένη φωτοχημική παραγωγή οξειδωτικών ενώσεων, αν και η συνολική επίδραση εξαρτάται και από τη σχετική υγρασία, τη νεφοκάλυψη και τη διαθεσιμότητα κατάλληλων οξειδωτικών.

Τα νιτρικά αερολύματα σχηματίζονται μέσω της μετατροπής των οξειδίων του αζώτου σε νιτρικό οξύ, το οποίο μπορεί να αντιδράσει με την αμμωνία και να σχηματίσει νιτρικό αμμώνιο:



Η ισορροπία αυτή εξαρτάται έντονα από τη θερμοκρασία και τη σχετική υγρασία. Σε χαμηλότερες θερμοκρασίες ευνοείται συχνά η παραμονή του νιτρικού αμμωνίου στη σωματιδιακή φάση, ενώ σε υψηλότερες θερμοκρασίες μπορεί να ενισχύεται η διάσπασή του προς αέρια NH₃ και HNO₃. Ο μηχανισμός αυτός μπορεί να συμβάλλει στην αυξημένη παρουσία σωματιδιακών νιτρικών κατά τις ψυχρότερες περιόδους, εφόσον υπάρχει επαρκής διαθεσιμότητα αμμωνίας και νιτρικού οξέος. Η θερμοκρασία επηρεάζει επίσης τον σχηματισμό δευτερογενών οργανικών αερολυμάτων. Πτητικές οργανικές ενώσεις

ανθρωπογενούς και βιογενούς προέλευσης οξειδώνονται μέσω αντιδράσεων με οξειδωτικά είδη και παράγουν ενώσεις χαμηλότερης πτητικότητας. Τα προϊόντα αυτά μπορεί να κατανέμονται στη σωματιδιακή φάση ή να συμπυκνώνονται πάνω σε υπάρχοντα σωματίδια. Οι υψηλότερες θερμοκρασίες μπορούν να αυξάνουν τις εκπομπές ορισμένων βιογενών και ανθρωπογενών πτητικών οργανικών ενώσεων και να επιταχύνουν επιμέρους αντιδράσεις οξείδωσης. Ταυτόχρονα, όμως, αυξάνουν την πτητικότητα πολλών ημιπτητικών οργανικών προϊόντων και μπορεί να ευνοούν τη μεταφορά τους από τη σωματιδιακή προς την αέρια φάση. Η σχέση μεταξύ θερμοκρασίας και συγκεντρώσεων PM_{10} ή $PM_{2.5}$ είναι, επομένως, αποτέλεσμα πολλών ταυτόχρονων και συχνά αντίρροπων διεργασιών. Οι υψηλότερες θερμοκρασίες μπορεί να ενισχύουν τις εκπομπές πρόδρομων ενώσεων και ορισμένες οδούς οξείδωσης, αλλά ταυτόχρονα να αυξάνουν την εξάτμιση ημιπτητικών ανόργανων και οργανικών συστατικών. Αντίθετα, οι χαμηλότερες θερμοκρασίες μπορεί να ευνοούν την παραμονή νιτρικών και άλλων ημιπτητικών ενώσεων στη σωματιδιακή φάση, ενώ συχνά συνυπάρχουν με ρηχότερο ατμοσφαιρικό οριακό στρώμα και περιορισμένη διασπορά.

Στο λεκανοπέδιο της Αθήνας, οι υψηλές θερινές θερμοκρασίες, η έντονη ηλιακή ακτινοβολία και η παρουσία ανθρωπογενών και βιογενών πρόδρομων ενώσεων μπορούν να ευνοούν ορισμένες οδούς σχηματισμού δευτερογενών οργανικών αερολυμάτων. Κατά τις ψυχρότερες περιόδους, αντίθετα, μπορεί να ευνοείται η παρουσία νιτρικού αμμωνίου και άλλων ημιπτητικών συστατικών στη σωματιδιακή φάση. Η πραγματική σύσταση των σωματιδίων εξαρτάται, ωστόσο, και από τη σχετική υγρασία, τη διαθεσιμότητα αμμωνίας, την ατμοσφαιρική οξείδωση και τη μεταφορά αέριων μαζών.

Η κατανόηση των μηχανισμών αυτών είναι χρήσιμη για την ερμηνεία της σχέσης μεταξύ θερμοκρασίας και PM_{10} στην παρούσα εργασία. Θετική στατιστική σχέση μπορεί να είναι συμβατή με αυξημένη ξηρότητα, επαναιώρηση σκόνης, μεταφορά ερημικής σκόνης, επιδράσεις πυρκαγιών ή ενισχυμένο σχηματισμό ορισμένων δευτερογενών οργανικών συστατικών. Αντίθετα, αρνητική σχέση μπορεί να συνδέεται με την εξάτμιση ημιπτητικών συστατικών, τη μειωμένη παρουσία νιτρικού αμμωνίου ή την εντονότερη κατακόρυφη ανάμιξη κατά τις θερμότερες ημέρες. Επειδή το PM_{10} περιλαμβάνει τόσο λεπτόκοκκα δευτερογενή σωματίδια όσο και χονδρόκοκκες πρωτογενείς συνιστώσες, καμία από τις παραπάνω διεργασίες δεν μπορεί να θεωρηθεί αποκλειστική εξήγηση μόνο με βάση τη στατιστική συσχέτιση με τη θερμοκρασία.

2.4 Αναμενόμενες σχέσεις της θερμοκρασίας με τους εξεταζόμενους ατμοσφαιρικούς ρύπους

Η σχέση μεταξύ της θερμοκρασίας και των συγκεντρώσεων των ατμοσφαιρικών ρύπων δεν αναμένεται να είναι ενιαία ως προς την κατεύθυνση και την έντασή της. Διαφοροποιείται ανάλογα με τις πηγές εκπομπής, τις φυσικοχημικές ιδιότητες και τους μηχανισμούς σχηματισμού, μετασχηματισμού και απομάκρυνσης κάθε ρύπου, καθώς και με τις επικρατούσες συνθήκες μεταφοράς και ατμοσφαιρικής διασποράς. Η θερμοκρασία μπορεί να συνδέεται με τις συγκεντρώσεις των ρύπων μέσω διαφορετικών και συχνά αντίρροπων μηχανισμών, όπως η μεταβολή της φωτοχημικής δραστηριότητας, η ανάπτυξη του ατμοσφαιρικού οριακού στρώματος, η κατακόρυφη ανάμιξη, οι εποχικές μεταβολές των εκπομπών και η διαφοροποίηση των διεργασιών ξηρής και υγρής απομάκρυνσης.

Παράλληλα, η θερμοκρασία συνδιακυμαίνεται με άλλες μετεωρολογικές παραμέτρους, όπως η ηλιακή ακτινοβολία, η ταχύτητα και η διεύθυνση του ανέμου, η σχετική υγρασία, η βροχόπτωση, η νεφοκάλυψη και η ατμοσφαιρική σταθερότητα. Για τον λόγο αυτό, μια στατιστική σχέση μεταξύ θερμοκρασίας και συγκέντρωσης ενός ρύπου δεν πρέπει να ερμηνεύεται ως αποτέλεσμα αποκλειστικής και άμεσης επίδρασης της θερμοκρασίας, αλλά ως ένδειξη συνδυασμένης επίδρασης μετεωρολογικών, χημικών και ανθρωπογενών παραγόντων.

Οι σχέσεις που προκύπτουν από τις ημερήσιες μέσες τιμές μπορεί να αντανακλούν σε σημαντικό βαθμό την κοινή εποχική διακύμανση της θερμοκρασίας και των ρύπων. Για παράδειγμα, οι υψηλότερες θερινές θερμοκρασίες συμπίπτουν συχνά με ευνοϊκότερες φωτοχημικές συνθήκες και αυξημένες συγκεντρώσεις O_3 , ενώ οι χαμηλότερες χειμερινές θερμοκρασίες μπορεί να συνοδεύονται από αυξημένες εκπομπές θέρμανσης και περιορισμένη διασπορά ορισμένων πρωτογενών ρύπων. Επομένως, οι συσχετίσεις των απόλυτων ημερήσιων τιμών μπορεί να ενσωματώνουν τόσο βραχυχρόνιους μηχανισμούς όσο και ευρύτερα εποχικά πρότυπα.

Αντίθετα, η ανάλυση των διαφορών μεταξύ διαδοχικών ημερών περιορίζει τη βραδεία εποχική συνιστώσα και επικεντρώνεται περισσότερο στη βραχυχρόνια συν-μεταβολή των μεταβλητών. Εξετάζεται, δηλαδή, κατά πόσο η αύξηση ή η μείωση της θερμοκρασίας από μία ημέρα στην επόμενη συνοδεύεται από μεταβολή της συγκέντρωσης ενός ρύπου προς την ίδια ή την αντίθετη κατεύθυνση. Ωστόσο, ούτε η προσέγγιση αυτή απομονώνει πλήρως

την επίδραση του ανέμου, της βροχόπτωσης, της υγρασίας, της ηλιακής ακτινοβολίας, της μεταφοράς αέριων μαζών ή των ημερήσιων μεταβολών των εκπομπών.

Σημαντική αναμένεται επίσης να είναι η χωρική διαφοροποίηση των σχέσεων. Στους κυκλοφοριακά επιβαρυνμένους και πυκνοδομημένους αστικούς σταθμούς μεγαλύτερη σημασία μπορεί να έχουν οι άμεσες εκπομπές, η γεωμετρία του δρόμου και οι τοπικές συνθήκες αερισμού. Στους σταθμούς αστικού υποβάθρου μπορεί να αποτυπώνεται περισσότερο η συνολική αστική επιβάρυνση και η επίδραση της ευρύτερης ατμοσφαιρικής κυκλοφορίας. Στους προαστιακούς και περιαστικούς σταθμούς ενδέχεται να αποκτούν μεγαλύτερο ρόλο η μεταφορά αέριων μαζών, η φωτοχημική ωρίμανση και η μικρότερη άμεση επίδραση τοπικών εκπομπών. Αντίστοιχα, στους βιομηχανικά επηρεασμένους σταθμούς οι σχέσεις μπορεί να διαμορφώνονται κυρίως από τη λειτουργία τοπικών πηγών, τη διεύθυνση του ανέμου και τη θέση του σταθμού ως προς τις εγκαταστάσεις.

Με βάση τους μηχανισμούς που αναπτύχθηκαν στις προηγούμενες ενότητες, για το NO αναμένονται συχνότερα αρνητικές ή ασθενείς σχέσεις με τη θερμοκρασία, ιδιαίτερα όταν οι χαμηλότερες θερμοκρασίες συνδέονται με αυξημένες εκπομπές και περιορισμένη διασπορά. Για το NO₂ αναμένεται επίσης συχνά αρνητική σχέση, αλλά με περισσότερο σύνθετη συμπεριφορά, καθώς ο ρύπος επηρεάζεται τόσο από άμεσες εκπομπές όσο και από φωτοχημικές μετατροπές. Για το O₃ αναμένεται κυρίως θετική σχέση, λόγω της σύνδεσής του με τις θερμές, ηλιόλουστες και φωτοχημικά ενεργές συνθήκες. Για τα PM₁₀ δεν αναμένεται ενιαία κατεύθυνση, εξαιτίας της ετερογένειας των πηγών και των μηχανισμών που καθορίζουν τις συγκεντρώσεις τους. Τέλος, για το SO₂ είναι πιθανότερες ασθενείς ή αρνητικές σχέσεις, οι οποίες μπορεί να διαφοροποιούνται σημαντικά σε βιομηχανικές και λιμενικές περιοχές.

Οι παραπάνω προσδοκίες δεν αποτελούν προκαθορισμένα αποτελέσματα, αλλά θεωρητικές υποθέσεις εργασίας βασισμένες στη φυσικοχημική συμπεριφορά των ρύπων και στα ευρήματα της σχετικής βιβλιογραφίας. Η εμπειρική ανάλυση θα δείξει κατά πόσο οι αναμενόμενες κατευθύνσεις επιβεβαιώνονται, διαφοροποιούνται ή δεν εμφανίζονται στους επιλεγμένους σταθμούς και στις εξεταζόμενες εποχές. Στις επόμενες υποενότητες παρουσιάζονται ειδικότερα οι αναμενόμενες σχέσεις της θερμοκρασίας με το NO, το NO₂, το O₃, τα PM₁₀ και το SO₂.

2.4.1 Αναμενόμενη σχέση της θερμοκρασίας με το NO

Το μονοξείδιο του αζώτου (NO) αποτελεί κυρίως πρωτογενή ατμοσφαιρικό ρύπο, ο οποίος παράγεται από διεργασίες καύσης και συνδέεται ιδιαίτερα με τις εκπομπές της οδικής κυκλοφορίας. Λόγω της χημικής του δραστηριότητας και της στενής σύνδεσής του με άμεσες πηγές, οι συγκεντρώσεις του παρουσιάζουν έντονη χωρική και χρονική μεταβλητότητα και είναι συνήθως υψηλότερες σε θέσεις που επηρεάζονται άμεσα από κυκλοφοριακές ή άλλες πηγές καύσης.

Με βάση την ευρύτερη εποχική διακύμανση, αναμένεται συχνά αρνητική σχέση μεταξύ θερμοκρασίας και συγκεντρώσεων NO. Οι ψυχρότερες συνθήκες μπορεί να συνδέονται με αυξημένη ένταση ορισμένων πηγών καύσης και με περιορισμένη ατμοσφαιρική διασπορά, γεγονός που ευνοεί τη διατήρηση υψηλότερων συγκεντρώσεων κοντά στην επιφάνεια. Αντίθετα, κατά τις θερμότερες περιόδους, η ευνοϊκότερη ανάμιξη της κατώτερης ατμόσφαιρας και η εντονότερη χημική μετατροπή του NO μπορούν να συμβάλλουν στη μείωσή του. Η αναμενόμενη αρνητική σχέση δεν οφείλεται, επομένως, σε έναν μόνο μηχανισμό, αλλά στη συνδυασμένη επίδραση μεταβολών στις εκπομπές, στη διασπορά και στη χημική συμπεριφορά του ρύπου.

Η μορφή της σχέσης αναμένεται να διαφοροποιείται ανάλογα με τον χαρακτήρα του σταθμού μέτρησης. Σε θέσεις που επηρεάζονται άμεσα από την κυκλοφορία, οι έντονες και βραχυχρόνιες μεταβολές των εκπομπών μπορεί να καλύπτουν ή να εξασθενούν τη σχέση με τη θερμοκρασία. Σε περιοχές μεγαλύτερης απόστασης από άμεσες πηγές, οι συγκεντρώσεις NO είναι συνήθως χαμηλότερες και επηρεάζονται περισσότερο από τις ευρύτερες συνθήκες μεταφοράς και χημικού μετασχηματισμού. Για τον λόγο αυτό, δεν αναμένεται η ίδια ένταση ή κατεύθυνση της σχέσης σε όλους τους σταθμούς.

Σημαντική είναι και η εποχική διαφοροποίηση. Όταν εξετάζονται οι απόλυτες ημερήσιες τιμές στο σύνολο της περιόδου, η αντίθεση μεταξύ υψηλότερων συγκεντρώσεων στις ψυχρότερες περιόδους και χαμηλότερων συγκεντρώσεων στις θερμότερες μπορεί να ενισχύει την αρνητική συσχέτιση. Όταν, όμως, η ανάλυση πραγματοποιείται χωριστά ανά εποχή, η κοινή εποχική διακύμανση περιορίζεται και η σχέση μπορεί να εμφανίζεται ασθενέστερη ή να μεταβάλλεται ως προς την κατεύθυνσή της. Στην περίπτωση αυτή αποκτούν μεγαλύτερη σημασία οι βραχυχρόνιες μεταβολές των εκπομπών, του ανέμου και της τοπικής ατμοσφαιρικής κυκλοφορίας.

Στην ανάλυση των διαφορών μεταξύ διαδοχικών ημερών, αύξηση της θερμοκρασίας μπορεί να συνοδεύεται από μείωση της συγκέντρωσης NO, όταν οι δύο μεταβολές συνδέονται με

ευνοϊκότερες συνθήκες αερισμού ή ταχύτερο χημικό μετασχηματισμό. Ωστόσο, οι αντίστοιχες σχέσεις αναμένεται να είναι γενικά ασθενέστερες και λιγότερο σταθερές από εκείνες των απόλυτων ημερήσιων τιμών. Η χρήση πρώτων διαφορών περιορίζει την επίδραση της εποχικότητας, αλλά αναδεικνύει περισσότερο τη συμβολή των βραχυχρόνιων και συχνά μεταβαλλόμενων συνθηκών.

Με βάση τα παραπάνω, η θεωρητικά αναμενόμενη σχέση μεταξύ θερμοκρασίας και NO είναι κυρίως αρνητική, ιδιαίτερα όταν εξετάζονται οι απόλυτες ημερήσιες τιμές σε ευρύτερη χρονική κλίμακα. Δεν αναμένεται, όμως, να παρουσιάζει σταθερή κατεύθυνση, ένταση ή στατιστική σημαντικότητα σε όλες τις εποχές και σε όλους τους σταθμούς, λόγω της ισχυρής εξάρτησης του NO από τις άμεσες εκπομπές και τις τοπικές συνθήκες ατμοσφαιρικής μεταφοράς και διασποράς.

2.4.2 Αναμενόμενη σχέση της θερμοκρασίας με το NO_2

Το διοξείδιο του αζώτου (NO_2) αποτελεί βασικό συστατικό της αστικής ατμοσφαιρικής ρύπανσης και συνδέεται κυρίως με διεργασίες καύσης, όπως η οδική κυκλοφορία, η θέρμανση, η παραγωγή ενέργειας και η βιομηχανική δραστηριότητα. Παράλληλα, σημαντικό μέρος του σχηματίζεται δευτερογενώς στην ατμόσφαιρα μέσω της οξειδωσης του NO . Για τον λόγο αυτό, η σχέση του με τη θερμοκρασία είναι περισσότερο σύνθετη από εκείνη του NO , καθώς επηρεάζεται ταυτόχρονα από άμεσες εκπομπές, χημικούς μετασχηματισμούς, φωτοδιάσπαση, μεταφορά και διασπορά.

Με βάση την ευρύτερη εποχική διακύμανση, η σχέση μεταξύ θερμοκρασίας και NO_2 αναμένεται συχνά να είναι αρνητική. Οι ψυχρότερες συνθήκες μπορεί να συνδέονται με αυξημένες εκπομπές από πηγές καύσης και με περιορισμένη ατμοσφαιρική διασπορά, ευνοώντας υψηλότερες συγκεντρώσεις κοντά στην επιφάνεια. Αντίθετα, κατά τις θερμότερες και περισσότερο φωτοχημικά ενεργές περιόδους, η ευνοϊκότερη ανάμιξη και η αυξημένη φωτοδιάσπαση του NO_2 μπορούν να συμβάλλουν στη μείωση των συγκεντρώσεών του. Ωστόσο, η οξείδωση του NO προς NO_2 μπορεί να λειτουργεί προς την αντίθετη κατεύθυνση, με αποτέλεσμα η τελική απόκριση να εξαρτάται από την ισορροπία μεταξύ σχηματισμού και απομάκρυνσης του ρύπου.

Η σχέση αναμένεται επίσης να διαφοροποιείται ανάλογα με τον χαρακτήρα του σταθμού. Σε κυκλοφοριακά επιβαρυνμένες θέσεις, οι άμεσες εκπομπές NO και NO_2 , η μεταβολή της

κυκλοφορίας και οι τοπικές συνθήκες αερισμού μπορεί να κυριαρχούν στη διαμόρφωση των συγκεντρώσεων. Σε σταθμούς αστικού υποβάθρου, προαστιακού ή περιαστικού χαρακτήρα, μεγαλύτερη σημασία μπορεί να αποκτούν η μεταφορά αέριων μαζών και οι φωτοχημικές μετατροπές, με αποτέλεσμα οι σχέσεις να εμφανίζονται ασθενέστερες ή περισσότερο διαφοροποιημένες εποχικά.

Η εποχική μεταβολή είναι πιθανό να επηρεάζει σημαντικά τη μορφή της σχέσης. Κατά τον χειμώνα, οι αυξημένες εκπομπές από καύσεις και οι δυσμενέστερες συνθήκες διασποράς μπορεί να ενισχύουν την αρνητική σύνδεση με τη θερμοκρασία. Κατά την άνοιξη και το καλοκαίρι, αντίθετα, η ισχυρότερη φωτοχημική δραστηριότητα και η εντονότερη ατμοσφαιρική ανάμιξη μπορεί να μειώνουν τα επίπεδα του NO_2 , χωρίς όμως να αποκλείεται η ενίσχυση του δευτερογενούς σχηματισμού του υπό κατάλληλες χημικές συνθήκες.

Στην ανάλυση των μεταβολών μεταξύ διαδοχικών ημερών, αύξηση της θερμοκρασίας μπορεί να συνοδεύεται από μείωση του NO_2 , όταν συνδέεται με ευνοϊκότερη διασπορά ή αυξημένη φωτοδιάσπαση. Οι αντίστοιχες σχέσεις αναμένεται, ωστόσο, να είναι συχνά ασθενέστερες και λιγότερο σταθερές από εκείνες των απόλυτων ημερήσιων τιμών, επειδή επηρεάζονται περισσότερο από τις βραχυχρόνιες μεταβολές των εκπομπών, του ανέμου, της ηλιακής ακτινοβολίας και της μεταφοράς αέριων μαζών.

Με βάση τα παραπάνω, η θεωρητικά αναμενόμενη σχέση μεταξύ θερμοκρασίας και NO_2 είναι συχνά αρνητική, χωρίς όμως να θεωρείται σταθερή σε όλες τις εποχές και σε όλους τους σταθμούς. Η ένταση και η κατεύθυνσή της εξαρτώνται από τη σχετική συμβολή των άμεσων εκπομπών, της φωτοχημικής παραγωγής και κατανάλωσης, των συνθηκών διασποράς και του χωρικού χαρακτήρα κάθε περιοχής.

2.4.3 Αναμενόμενη σχέση της θερμοκρασίας με το O_3

Το τροποσφαιρικό όζον (O_3) αποτελεί δευτερογενή ατμοσφαιρικό ρύπο, καθώς δεν εκπέμπεται άμεσα από συγκεκριμένες πηγές, αλλά σχηματίζεται μέσω φωτοχημικών αντιδράσεων στις οποίες συμμετέχουν τα οξείδια του αζώτου, οι πτητικές οργανικές ενώσεις και η ηλιακή ακτινοβολία. Η συμπεριφορά του διαφέρει από εκείνη των πρωτογενών ρύπων, επειδή οι συγκεντρώσεις του εξαρτώνται από την ισορροπία μεταξύ φωτοχημικής παραγωγής, κατανάλωσης, μεταφοράς και απόθεσης.

Με βάση την ευρύτερη εποχική διακύμανση, αναμένεται συχνά θετική σχέση μεταξύ θερμοκρασίας και συγκεντρώσεων O_3 . Οι υψηλότερες θερμοκρασίες συνυπάρχουν συνήθως με αυξημένη ηλιακή ακτινοβολία και ευνοϊκότερες συνθήκες φωτοχημικής δραστηριότητας, ενώ μπορούν επίσης να ενισχύουν τις εκπομπές ορισμένων βιογενών και ανθρωπογενών πτητικών οργανικών ενώσεων. Ωστόσο, η θερμοκρασία δεν αποτελεί τον άμεσο παράγοντα φωτοδιάσπασης του NO_2 , η οποία εξαρτάται κυρίως από την ηλιακή ακτινοβολία. Επομένως, η θετική σχέση θερμοκρασίας– O_3 αντανακλά τη συνδυασμένη επίδραση μετεωρολογικών και χημικών παραγόντων και δεν τεκμηριώνει από μόνη της άμεση αιτιώδη επίδραση της θερμοκρασίας.

Η καθαρή παραγωγή O_3 εξαρτάται από τη διαθεσιμότητα NO_x και πτητικών οργανικών ενώσεων, καθώς και από τη μεταξύ τους αναλογία. Η απόκριση του όζοντος δεν είναι πάντοτε γραμμική, επειδή το φωτοχημικό καθεστώς μπορεί να χαρακτηρίζεται από περιορισμό είτε από τα NO_x είτε από τις πτητικές οργανικές ενώσεις. Για τον λόγο αυτό, παρόμοια αύξηση της θερμοκρασίας μπορεί να συνοδεύεται από διαφορετική μεταβολή των συγκεντρώσεων O_3 σε διαφορετικές περιοχές.

Η χωρική διαφοροποίηση αναμένεται να είναι ιδιαίτερα σημαντική. Σε κυκλοφοριακά επιβαρυνμένες θέσεις, οι αυξημένες συγκεντρώσεις NO μπορούν να καταναλώνουν το O_3 μέσω τιτλοδότησης, με αποτέλεσμα χαμηλότερα επίπεδα κοντά στις άμεσες πηγές. Αντίθετα, σε προαστιακούς και περιαστικούς σταθμούς, η μικρότερη άμεση παρουσία NO , η μεταφορά πρόδρομων ενώσεων και η φωτοχημική ωρίμανση των αέριων μαζών μπορούν να ευνοούν υψηλότερες συγκεντρώσεις. Η χωρική κατανομή του ρύπου επηρεάζεται επιπλέον από τον άνεμο, τη θαλάσσια αύρα, την τοπογραφία και τον χρόνο παραμονής των αέριων μαζών.

Η εποχική διαφοροποίηση είναι επίσης έντονη. Κατά την άνοιξη και ιδιαίτερα το καλοκαίρι, οι υψηλότερες θερμοκρασίες, η εντονότερη ηλιοφάνεια και η μεγαλύτερη διάρκεια της ημέρας ευνοούν συνήθως τη φωτοχημική παραγωγή O_3 . Αντίθετα, κατά τον χειμώνα, η ασθενέστερη ηλιακή ακτινοβολία και η αυξημένη παρουσία NO κοντά στις πηγές περιορίζουν συνήθως τη συσσώρευσή του. Έτσι, η σχέση των απόλυτων ημερήσιων τιμών της θερμοκρασίας και του O_3 μπορεί να εμφανίζεται σαφώς θετική, αποτυπώνοντας σε σημαντικό βαθμό το κοινό εποχικό πρότυπο των δύο μεταβλητών.

Στην ανάλυση των μεταβολών μεταξύ διαδοχικών ημερών, αύξηση της θερμοκρασίας μπορεί να συνοδεύεται από αύξηση της συγκέντρωσης O_3 , όταν συνδέεται με εντονότερη

ηλιακή ακτινοβολία, μεγαλύτερη φωτοχημική δραστηριότητα και ευνοϊκές συνθήκες παραμονής των αέριων μαζών. Οι αντίστοιχες σχέσεις αναμένεται, ωστόσο, να είναι ασθενέστερες και λιγότερο σταθερές από εκείνες των απόλυτων ημερήσιων τιμών, επειδή οι πρώτες διαφορές περιορίζουν την κοινή εποχική διακύμανση και επηρεάζονται περισσότερο από τις βραχυχρόνιες μεταβολές του ανέμου, της νεφοκάλυψης και της μεταφοράς.

Με βάση τα παραπάνω, η θεωρητικά αναμενόμενη σχέση μεταξύ θερμοκρασίας και O_3 είναι κυρίως θετική, ιδιαίτερα κατά τις θερμές εποχές και όταν εξετάζονται οι απόλυτες ημερήσιες τιμές. Η σχέση αναμένεται συχνά να είναι εντονότερη σε προαστιακούς και περιαστικούς σταθμούς και ασθενέστερη σε κυκλοφοριακά επιβαρυνμένες θέσεις, όπου η τιτλοδότηση από το NO μπορεί να περιορίζει τις συγκεντρώσεις. Η κατεύθυνση, η ένταση και η στατιστική σημαντικότητα της σχέσης θα αξιολογηθούν εμπειρικά.

2.4.4 Αναμενόμενη σχέση της θερμοκρασίας με τα PM_{10}

Τα αιωρούμενα σωματίδια PM_{10} αποτελούν ετερογενές μίγμα σωματιδίων φυσικής και ανθρωπογενούς προέλευσης. Στις πηγές τους περιλαμβάνονται η οδική κυκλοφορία, η θέρμανση, οι βιομηχανικές και κατασκευαστικές δραστηριότητες, η επαναιώρηση οδικής και εδαφικής σκόνης, οι δασικές πυρκαγιές, τα θαλάσσια αερολύματα και η μεταφορά ερημικής σκόνης. Οι συγκεντρώσεις τους επηρεάζονται επίσης από τον δευτερογενή σχηματισμό σωματιδιακών συστατικών, τη μεταφορά αέριων μαζών και τις διεργασίες ξηρής και υγρής απομάκρυνσης. Εξαιτίας αυτής της ετερογένειας, η σχέση μεταξύ θερμοκρασίας και PM_{10} δεν αναμένεται να παρουσιάζει ενιαία ή σταθερή κατεύθυνση σε όλες τις εποχές και στους διαφορετικούς τύπους σταθμών.

Κατά τις θερμές και ξηρές περιόδους, η περιορισμένη υγρασία των επιφανειών και η απουσία βροχόπτωσης μπορούν να αυξάνουν τη διαθεσιμότητα σωματιδιακού υλικού για επαναιώρηση. Υπό αυτές τις συνθήκες, η κίνηση των οχημάτων και ο άνεμος μπορεί να ενισχύουν την επανεισαγωγή οδικής και εδαφικής σκόνης στην ατμόσφαιρα. Θετικές σχέσεις μεταξύ θερμοκρασίας και PM_{10} είναι επίσης πιθανό να εμφανίζονται κατά τη διάρκεια επεισοδίων μεταφοράς ερημικής σκόνης ή καπνού από δασικές πυρκαγιές. Στις περιπτώσεις αυτές, η θερμοκρασία δεν αποτελεί άμεση αιτία της αύξησης των συγκεντρώσεων, αλλά μπορεί να συνδιακυμαίνεται με τις ευρύτερες μετεωρολογικές

συνθήκες που ευνοούν την ξηρότητα, τη μεταφορά σκόνης ή την εκδήλωση και εξάπλωση πυρκαγιών.

Αντίθετα, κατά τις ψυχρότερες περιόδους, οι συγκεντρώσεις PM_{10} μπορεί να αυξάνονται λόγω εκπομπών από την οικιακή θέρμανση, την καύση βιομάζας και άλλες διεργασίες καύσης. Όταν οι αυξημένες αυτές εκπομπές συνδυάζονται με ατμοσφαιρική σταθερότητα και περιορισμένη διασπορά, είναι δυνατό να εμφανίζονται υψηλότερες συγκεντρώσεις στις ψυχρότερες ημέρες και, επομένως, αρνητικές σχέσεις με τη θερμοκρασία. Η βροχόπτωση μπορεί, ωστόσο, να λειτουργεί προς την αντίθετη κατεύθυνση μέσω της υγρής απομάκρυνσης των σωματιδίων, γεγονός που δείχνει ότι η παρατηρούμενη σχέση με τη θερμοκρασία ενσωματώνει συχνά τη συνδυασμένη επίδραση περισσότερων μετεωρολογικών παραμέτρων.

Η θερμοκρασία μπορεί επίσης να επηρεάζει την κατανομή ορισμένων ημιπτητικών ενώσεων μεταξύ αέριας και σωματιδιακής φάσης. Σε χαμηλότερες θερμοκρασίες ευνοείται συχνά η παραμονή νιτρικών και ορισμένων οργανικών ενώσεων στη σωματιδιακή φάση, ενώ σε υψηλότερες θερμοκρασίες μπορεί να ενισχύεται η εξάτμισή τους. Παράλληλα, οι θερμές και ηλιόλουστες συνθήκες μπορεί να ευνοούν τον σχηματισμό ορισμένων δευτερογενών οργανικών αερολυμάτων. Η συνολική απόκριση των PM_{10} εξαρτάται, επομένως, από την ισορροπία μεταξύ άμεσων εκπομπών, επαναιώρησης, μεταφοράς, δευτερογενούς σχηματισμού, εξάτμισης και απομάκρυνσης.

Η μορφή της σχέσης αναμένεται να διαφοροποιείται ανάλογα με τον χωρικό και λειτουργικό χαρακτήρα του σταθμού. Σε κυκλοφοριακά επιβαρυμένες θέσεις μπορεί να αποκτά μεγαλύτερη σημασία η επαναιώρηση οδικής σκόνης, η φθορά των φρένων, των ελαστικών και του οδοστρώματος, καθώς και οι άμεσες εκπομπές καύσης. Σε βιομηχανικά επηρεασμένες περιοχές, οι συγκεντρώσεις μπορεί να συνδέονται περισσότερο με παραγωγικές δραστηριότητες, διακίνηση υλικών και τη διεύθυνση του ανέμου. Αντίθετα, σε προαστιακούς και περιαστικούς σταθμούς μπορεί να είναι σημαντικότερη η περιφερειακή μεταφορά σκόνης ή καπνού από απομακρυσμένες πηγές.

Στην ανάλυση των μεταβολών μεταξύ διαδοχικών ημερών, αύξηση της θερμοκρασίας μπορεί να συνοδεύεται από αύξηση των PM_{10} όταν συνδέεται με ξηρότερες επιφάνειες, περιορισμένη βροχόπτωση, επαναιώρηση ή μεταφορά σωματιδιακού υλικού. Μπορεί, αντίθετα, να συνοδεύεται από μείωση όταν οι θερμότερες συνθήκες συμπίπτουν με εντονότερη ατμοσφαιρική ανάμιξη ή αυξημένη εξάτμιση ημιπτητικών συστατικών. Οι σχέσεις αυτές αναμένεται να είναι συχνά ασθενείς ή μεταβαλλόμενες, επειδή οι πρώτες

διαφορές επηρεάζονται έντονα από τις ταυτόχρονες μεταβολές του ανέμου, της βροχόπτωσης, της υγρασίας και της προέλευσης των αέριων μαζών.

Με βάση τα παραπάνω, δεν αναμένεται ενιαία ή σταθερή κατεύθυνση στη σχέση μεταξύ θερμοκρασίας και PM_{10} . Θετικές σχέσεις μπορεί να εμφανίζονται όταν κυριαρχούν η ξηρότητα, η επαναιώρηση, η μεταφορά σκόνης και οι δασικές πυρκαγιές, ενώ αρνητικές σχέσεις μπορεί να συνδέονται με αυξημένες χειμερινές εκπομπές και περιορισμένη διασπορά. Είναι επίσης πιθανό να προκύπτουν ασθενείς ή μη στατιστικά σημαντικές σχέσεις, λόγω της ετερογένειας της σύστασης και των πηγών των PM_{10} . Η κατεύθυνση και η ένταση των εμπειρικών σχέσεων πρέπει, επομένως, να ερμηνεύονται ανά εποχή και σταθμό και όχι ως αποτέλεσμα ενός μοναδικού μηχανισμού.

2.4.5 Αναμενόμενη σχέση της θερμοκρασίας με το SO_2

Το διοξείδιο του θείου (SO_2) αποτελεί κυρίως πρωτογενή ατμοσφαιρικό ρύπο, ο οποίος συνδέεται με την καύση καυσίμων που περιέχουν θείο και με συγκεκριμένες βιομηχανικές, ενεργειακές, ναυτιλιακές και λιμενικές δραστηριότητες. Οι συγκεντρώσεις του επηρεάζονται από την ένταση και τη χωρική θέση των πηγών εκπομπής, τη διεύθυνση και την ταχύτητα του ανέμου, τις συνθήκες ατμοσφαιρικής διασποράς και τις διεργασίες χημικού μετασχηματισμού και απομάκρυνσης.

Όταν εξετάζονται οι απόλυτες ημερήσιες τιμές σε ευρύτερη χρονική κλίμακα, αναμένεται συχνά αρνητική ή ασθενής σχέση μεταξύ θερμοκρασίας και SO_2 . Οι χαμηλότερες θερμοκρασίες μπορεί να συνδέονται με αυξημένη κατανάλωση καυσίμων για θέρμανση και με δυσμενέστερες συνθήκες αερισμού, ευνοώντας υψηλότερες συγκεντρώσεις κοντά στην επιφάνεια. Αντίθετα, κατά τις θερμότερες περιόδους, η ευνοϊκότερη διασπορά και η ενίσχυση ορισμένων οδών οξείδωσης του SO_2 προς θεικές ενώσεις μπορούν να συμβάλλουν στη μείωση του αέριου ρύπου. Η συμπεριφορά αυτή δεν αποτελεί, ωστόσο, άμεση και καθολική συνέπεια της θερμοκρασίας, καθώς εξαρτάται και από τη σχετική υγρασία, την ατμοσφαιρική κυκλοφορία και τη θέση των πηγών.

Η σχέση αναμένεται να διαφοροποιείται σημαντικά ανάλογα με τον χαρακτήρα του σταθμού. Σε βιομηχανικά, ενεργειακά ή λιμενικά επηρεασμένες περιοχές, οι συγκεντρώσεις μπορεί να καθορίζονται κυρίως από τη λειτουργία συγκεκριμένων εγκαταστάσεων, τη

χρονική μεταβλητότητα των δραστηριοτήτων και τη διεύθυνση του ανέμου. Στις περιπτώσεις αυτές, οι μεταβολές των τοπικών εκπομπών και της μεταφοράς είναι δυνατό να υπερισχύουν της σχέσης με τη θερμοκρασία, οδηγώντας σε ασθενείς, ασταθείς ή ακόμη και διαφορετικής κατεύθυνσης συσχετίσεις. Σε περισσότερο αστικές θέσεις, η σχέση μπορεί να επηρεάζεται κυρίως από τις εποχικές μεταβολές της κατανάλωσης καυσίμων και τις τοπικές συνθήκες αερισμού.

Η εποχική διαφοροποίηση αναμένεται επίσης να είναι σημαντική. Η αντίθεση μεταξύ χαμηλότερων χειμερινών θερμοκρασιών και πιθανώς υψηλότερων επιπέδων SO_2 , αφενός, και υψηλότερων θερινών θερμοκρασιών και χαμηλότερων συγκεντρώσεων, αφετέρου, μπορεί να δημιουργεί αρνητική σχέση στις απόλυτες ημερήσιες τιμές. Όταν, όμως, η ανάλυση πραγματοποιείται χωριστά ανά εποχή, η σχέση μπορεί να εξασθενεί ή να μεταβάλλεται, καθώς αποκτούν μεγαλύτερη σημασία οι βραχυχρόνιες αλλαγές του ανέμου, της λειτουργίας των πηγών και των συνθηκών μεταφοράς.

Στην ανάλυση των μεταβολών μεταξύ διαδοχικών ημερών, αύξηση της θερμοκρασίας μπορεί να συνοδεύεται από μείωση του SO_2 , όταν οι θερμότερες συνθήκες συνδέονται με ευνοϊκότερο αερισμό ή εντονότερο χημικό μετασχηματισμό. Οι αντίστοιχες σχέσεις αναμένεται, ωστόσο, να είναι ασθενέστερες και λιγότερο σταθερές από εκείνες των απόλυτων ημερήσιων τιμών, επειδή επηρεάζονται περισσότερο από τις βραχυχρόνιες μεταβολές της διεύθυνσης του ανέμου, της λειτουργίας των πηγών και της σχετικής υγρασίας.

Η ερμηνεία των σχέσεων θερμοκρασίας- SO_2 πρέπει ακόμη να λαμβάνει υπόψη τη μακροχρόνια εξέλιξη των εκπομπών SO_x κατά την περίοδο μελέτης. Οι αλλαγές στο ενεργειακό μίγμα, στην ποιότητα των καυσίμων, στις τεχνολογίες περιορισμού των εκπομπών, στη βιομηχανική δραστηριότητα και στο κανονιστικό πλαίσιο μπορεί να επηρεάζουν τις συγκεντρώσεις ανεξάρτητα από τις θερμοκρασιακές μεταβολές.

Με βάση τα παραπάνω, η θεωρητικά αναμενόμενη σχέση μεταξύ θερμοκρασίας και SO_2 είναι συνήθως αρνητική ή ασθενής, χωρίς όμως να αναμένεται σταθερή κατεύθυνση ή ένταση σε όλες τις εποχές και σε όλους τους σταθμούς. Ιδιαίτερα στις βιομηχανικές και λιμενικές περιοχές, οι τοπικές πηγές, η λειτουργία των εγκαταστάσεων και η διεύθυνση του ανέμου μπορεί να αποτελούν ισχυρότερους προσδιοριστικούς παράγοντες από τη θερμοκρασία. Η κατεύθυνση, το μέγεθος και η στατιστική σημαντικότητα της σχέσης θα αξιολογηθούν εμπειρικά.

2.5 Προηγούμενες μελέτες

Η σχέση μεταξύ των μετεωρολογικών συνθηκών και της ατμοσφαιρικής ρύπανσης έχει αποτελέσει αντικείμενο εκτεταμένης έρευνας στην Ελλάδα και διεθνώς. Ιδιαίτερη έμφαση έχει δοθεί στη θερμοκρασία, στην ηλιακή ακτινοβολία, στην ταχύτητα και στη διεύθυνση του ανέμου, στη σχετική υγρασία, στη βροχόπτωση και στο ύψος του ατμοσφαιρικού οριακού στρώματος, καθώς οι παράμετροι αυτές επηρεάζουν τις εκπομπές, τη μεταφορά, τη διασπορά, τον χημικό μετασχηματισμό και την απομάκρυνση των ατμοσφαιρικών ρύπων. Τα ευρήματα της προηγούμενης βιβλιογραφίας δείχνουν ότι η σχέση με τη θερμοκρασία δεν είναι ίδια για όλους τους ρύπους ούτε παραμένει σταθερή μεταξύ διαφορετικών περιοχών, εποχών και τύπων σταθμών. Για το τροποσφαιρικό O_3 καταγράφονται συχνά θετικές σχέσεις, ιδιαίτερα κατά τις θερμές και ηλιόλουστες περιόδους, λόγω των ευνοϊκότερων φωτοχημικών συνθηκών. Για ρύπους που επηρεάζονται έντονα από άμεσες εκπομπές, όπως το NO και το SO_2 , αναφέρονται συχνά αρνητικές ή ασθενείς σχέσεις με τη θερμοκρασία, ενώ αντίστοιχη αλλά πιο σύνθετη συμπεριφορά παρατηρείται σε αρκετές μελέτες και για το NO_2 . Για τα αιωρούμενα σωματίδια, τα αποτελέσματα εμφανίζονται περισσότερο ανομοιογενή, καθώς οι συγκεντρώσεις PM_{10} και $PM_{2.5}$ επηρεάζονται από άμεσες εκπομπές, δευτερογενή σχηματισμό, επαναιώρηση σκόνης, βροχόπτωση, δασικές πυρκαγιές και μεταφορά από απομακρυσμένες πηγές.

Οι αποκλίσεις μεταξύ των αποτελεσμάτων διαφορετικών μελετών συνδέονται σε σημαντικό βαθμό με τις μεθοδολογικές επιλογές. Ορισμένες αναλύσεις βασίζονται σε ωριαίες συγκεντρώσεις, άλλες σε ημερήσιες μέσες τιμές και άλλες σε μηνιαία ή ετήσια δεδομένα. Η χρονική ανάλυση μπορεί να επηρεάζει ουσιαστικά την παρατηρούμενη σχέση, επειδή οι ωριαίες τιμές αποτυπώνουν καλύτερα τον ημερήσιο κύκλο και τα βραχυχρόνια επεισόδια, ενώ οι ημερήσιες και μηνιαίες μέσες τιμές εξομαλύνουν μέρος αυτής της μεταβλητότητας. Διαφοροποιήσεις εμφανίζονται επίσης ως προς τη διάρκεια της περιόδου μελέτης, τον αριθμό, τη χωρική κατανομή και τον τύπο των σταθμών, καθώς και ως προς τις στατιστικές τεχνικές που εφαρμόζονται. Ορισμένες μελέτες χρησιμοποιούν απλούς συντελεστές συσχέτισης ή γραμμικά μοντέλα, ενώ άλλες εφαρμόζουν μη γραμμικές, πολυμεταβλητές ή χρονοσειριακές προσεγγίσεις. Καθοριστική είναι και η ενσωμάτωση πρόσθετων παραμέτρων, όπως ο άνεμος, η βροχόπτωση, η σχετική υγρασία, η ηλιακή ακτινοβολία, η ημέρα της εβδομάδας, η εποχικότητα και οι μακροχρόνιες τάσεις των εκπομπών.

Ιδιαίτερη σημασία έχει η διάκριση μεταξύ μελετών που εξετάζουν τα απόλυτα επίπεδα της θερμοκρασίας και των συγκεντρώσεων και εκείνων που επικεντρώνονται στις βραχυχρόνιες μεταβολές τους. Οι αναλύσεις των απόλυτων τιμών μπορεί να αποτυπώνουν σε σημαντικό βαθμό την κοινή εποχική διακύμανση των μεταβλητών. Για παράδειγμα, μια αρνητική σχέση μεταξύ θερμοκρασίας και NO_2 μπορεί να αντανακλά την αντίθεση μεταξύ υψηλότερων χειμερινών συγκεντρώσεων και υψηλότερων θερινών θερμοκρασιών, χωρίς να συνεπάγεται ότι κάθε ημερήσια αύξηση της θερμοκρασίας προκαλεί άμεση μείωση του NO_2 .

Αντίθετα, η εξέταση των διαφορών μεταξύ διαδοχικών ημερών περιορίζει τη βραδεία εποχική συνιστώσα και επικεντρώνεται περισσότερο στη βραχυχρόνια συν-μεταβολή της θερμοκρασίας και των συγκεντρώσεων. Δεν εξαλείφει, ωστόσο, την επίδραση άλλων μετεωρολογικών μεταβλητών ή των ημερήσιων μεταβολών στις εκπομπές. Επιπλέον, η διαφοροποίηση των χρονοσειρών μπορεί να ενισχύει τη σχετική επίδραση της βραχυχρόνιας μεταβλητότητας και του τυχαίου θορύβου, οδηγώντας σε ασθενέστερες ή περισσότερο ασταθείς συσχετίσεις.

Η σύγκριση μεταξύ μελετών απαιτεί επίσης προσοχή ως προς τον τρόπο μέτρησης των ρύπων και των μετεωρολογικών παραμέτρων. Η θέση και το ύψος των σταθμών, η απόστασή τους από κύριες πηγές, η πληρότητα των χρονοσειρών, η διαχείριση των ελλειπών τιμών και των ακραίων επεισοδίων και η χρήση διαφορετικών χρονικών αντιστοιχίσεων μπορούν να επηρεάζουν τα αποτελέσματα. Ειδικά για το O_3 , οι ημερήσιες μέσες τιμές μπορεί να εξομαλύνουν τις υψηλές απογευματινές συγκεντρώσεις και να αποτυπώνουν διαφορετική σχέση από εκείνη που προκύπτει από τις ημερήσιες μέγιστες ή τις μέγιστες κυλιόμενες μέσες τιμές.

Η βιβλιογραφική επισκόπηση που ακολουθεί οργανώνεται σε δύο βασικά μέρη. Αρχικά παρουσιάζονται μελέτες που έχουν πραγματοποιηθεί στην Ελλάδα και ιδιαίτερα στο λεκανοπέδιο της Αθήνας, ώστε να αναδειχθούν τα χαρακτηριστικά του εγχώριου αστικού και μεσογειακού περιβάλλοντος. Στη συνέχεια εξετάζονται διεθνείς μελέτες από διαφορετικές κλιματικές, γεωγραφικές και αστικές περιοχές, με στόχο τη σύγκριση των ευρημάτων και την ανάδειξη κοινών προτύπων, διαφοροποιήσεων και μεθοδολογικών προσεγγίσεων.

Η σύνθεση της προηγούμενης βιβλιογραφίας συμβάλλει στη διαμόρφωση του θεωρητικού πλαισίου και παρέχει τη βάση για την ερμηνεία των αποτελεσμάτων της παρούσας εργασίας. Παράλληλα, αναδεικνύει πεδία που έχουν διερευνηθεί σε μικρότερο βαθμό, όπως

η παράλληλη εξέταση πολλών ρύπων, η σύγκριση διαφορετικών τύπων σταθμών και εποχών και η αντιπαραβολή των σχέσεων που προκύπτουν από τα απόλυτα ημερήσια επίπεδα με εκείνες που βασίζονται στις μεταβολές μεταξύ διαδοχικών ημερών στο λεκανοπέδιο της Αθήνας.

2.5.1 Μελέτες στην Ελλάδα και στην Αθήνα

Η σχέση μεταξύ των μετεωρολογικών συνθηκών και της ατμοσφαιρικής ρύπανσης στον ελληνικό χώρο έχει διερευνηθεί εκτενέστερα στο λεκανοπέδιο της Αθήνας. Η υψηλή πληθυσμιακή πυκνότητα, η έντονη οδική κυκλοφορία, η παρουσία βιομηχανικών, ενεργειακών και λιμενικών δραστηριοτήτων και η ιδιαίτερη γεωμορφολογία της περιοχής καθιστούν την Αθήνα σύνθετο πεδίο μελέτης της χωρικής και χρονικής μεταβλητότητας των ατμοσφαιρικών ρύπων. Η μορφολογία του λεκανοπεδίου και οι ορεινοί όγκοι που περιβάλλουν μεγάλο μέρος του μπορούν, υπό συγκεκριμένες μετεωρολογικές συνθήκες, να περιορίζουν τον αερισμό και να ευνοούν τη συσσώρευση ρύπων. Παράλληλα, η γειτνίαση με τον Σαρωνικό Κόλπο και η ανάπτυξη της θαλάσσιας αύρας επηρεάζουν τη μεταφορά αέριων μαζών από τις παράκτιες και κεντρικές περιοχές προς το εσωτερικό και τα βόρεια τμήματα του λεκανοπεδίου, συμβάλλοντας στη χωρική διαφοροποίηση των συγκεντρώσεων μεταξύ σταθμών διαφορετικού χαρακτήρα.

Οι Grivas et al. (2004) διερεύνησαν τη χωρική και χρονική μεταβλητότητα των συγκεντρώσεων PM_{10} στην ευρύτερη περιοχή της Αθήνας, χρησιμοποιώντας δεδομένα από σταθμούς διαφορετικού χαρακτήρα. Τα αποτελέσματα ανέδειξαν σημαντικές χωρικές διαφοροποιήσεις και ισχυρή σύνδεση των PM_{10} με πρωτογενείς ρύπους που σχετίζονται με την οδική κυκλοφορία. Το εύρημα αυτό υποστηρίζει την ανάγκη εξέτασης των αποτελεσμάτων χωριστά ανά σταθμό, καθώς μια ενιαία μέση συγκέντρωση για ολόκληρη την Αθήνα θα μπορούσε να αποκρύψει ουσιαστικές χωρικές διαφορές. Σε μεταγενέστερη εργασία, οι Grivas et al. (2008) εξέτασαν το πρόβλημα των PM_{10} στη μητροπολιτική περιοχή της Αθήνας, λαμβάνοντας υπόψη τόσο τις τοπικές πηγές όσο και τη μεταφορά σωματιδίων μεγάλης κλίμακας. Η ανάλυση των οπισθοτροχιών των αέριων μαζών έδειξε ότι μέρος των επεισοδίων αυξημένων συγκεντρώσεων μπορούσε να αποδοθεί σε διασυνοριακή μεταφορά, ενώ ορισμένα από τα εντονότερα επεισόδια συνδέθηκαν με

μεταφορά σκόνης από τη Σαχάρα και τη δυτική Μεσόγειο. Τα ευρήματα δείχνουν ότι η σχέση μεταξύ θερμοκρασίας και PM_{10} δεν μπορεί να ερμηνεύεται αποκλειστικά με βάση τις τοπικές εκπομπές ή την επαναιώρηση.

Οι Mavroidis και Ili (2012) εξέτασαν τις χρονικές τάσεις των συγκεντρώσεων NO_x , NO_2 και O_3 σε διαφορετικούς τύπους σταθμών παρακολούθησης της ποιότητας του αέρα στην Αθήνα. Η μελέτη ανέδειξε διαφοροποιήσεις που συνδέονται με την απόσταση από τις άμεσες πηγές εκπομπής και με τη φωτοχημική αλληλεπίδραση μεταξύ NO , NO_2 και O_3 . Σε θέσεις έντονης κυκλοφοριακής επίδρασης, οι υψηλές συγκεντρώσεις NO μπορούν να οδηγούν σε κατανάλωση του O_3 μέσω τιτλοδότησης, ενώ σε σταθμούς υποβάθρου ή πιο απομακρυσμένες θέσεις η φωτοχημική εξέλιξη των αέριων μαζών μπορεί να συνδέεται με υψηλότερα επίπεδα O_3 .

Οι Mavrakou et al. (2012) εξέτασαν την επίδραση της θαλάσσιας αύρας στην ατμοσφαιρική ρύπανση του λεκανοπεδίου υπό διαφορετικά συνοπτικά πρότυπα. Η μελέτη έδειξε ότι η θαλάσσια αύρα και οι ζώνες σύγκλισης μπορούν να επηρεάζουν τη μεταφορά, τη χωρική ανακατανομή και τη συσσώρευση ρύπων, ιδιαίτερα στο βόρειο τμήμα του λεκανοπεδίου. Το εύρημα αυτό είναι σημαντικό για την ερμηνεία διαφορών μεταξύ αστικών, προαστιακών και περιαστικών σταθμών.

Οι Liakakou et al. (2022) πραγματοποίησαν μετρήσεις υψηλής χρονικής ανάλυσης του SO_2 , του HNO_3 και του HCl σε αστικό περιβάλλον της Αθήνας κατά την περίοδο 2014–2016. Τα αποτελέσματα έδειξαν χαμηλότερα μέσα επίπεδα SO_2 και HNO_3 σε σύγκριση με παλαιότερες περιόδους και ανέδειξαν τη σημασία της εποχικότητας, της προέλευσης των αέριων μαζών και των φυσικοχημικών μετατροπών. Η εργασία αυτή είναι χρήσιμη για την ερμηνεία του SO_2 , καθώς δείχνει ότι οι συγκεντρώσεις του εξαρτώνται όχι μόνο από τις άμεσες εκπομπές, αλλά και από διαχρονικές αλλαγές των πηγών, χημική οξείδωση και μεταφορά.

Οι Kalabokas et al. (2023) εξέτασαν την εποχική και διαχρονική μεταβλητότητα της πρωτογενούς και δευτερογενούς φωτοχημικής ρύπανσης στην Αθήνα κατά την περίοδο 2001–2021. Η ανάλυση βασίστηκε στις συγκεντρώσεις NO_x , O_3 και ολικών οξειδωτικών ενώσεων O_x σε σταθμούς διαφορετικού χαρακτήρα και ανέδειξε διαφοροποιήσεις μεταξύ αστικών και περιφερειακών θέσεων. Παρότι η μελέτη δεν εξετάζει αποκλειστικά τη σχέση του O_3 με τη θερμοκρασία, παρέχει σημαντικό πλαίσιο για την ερμηνεία των φωτοχημικών ρύπων στην Αθήνα.

Συμπληρωματικά προς τις μελέτες ποιότητας του αέρα, οι έρευνες για την αστική θερμική νησίδα της Αθήνας παρέχουν πληροφορίες για τη χωρική διαφοροποίηση των θερμοκρασιακών συνθηκών. Οι Founda και Santamouris (2017) εξέτασαν την αλληλεπίδραση μεταξύ αστικής θερμικής νησίδας και καυσώνων, δείχνοντας ότι η ένταση και η μορφή του φαινομένου κατά τα θερμά επεισόδια εξαρτώνται σημαντικά από το ανεμολογικό υπόβαθρο και τη θαλάσσια αύρα. Οι van der Schriek et al. (2020) εξέτασαν τις ιστορικές μεταβολές της αστικής θερμικής νησίδας της Αθήνας και ανέδειξαν ότι η θερμική διαφοροποίηση μεταξύ αστικών και λιγότερο αστικοποιημένων θέσεων μεταβάλλεται ανάλογα με την εποχή, την ώρα της ημέρας και το θερμοκρασιακό καθεστώς. Συνολικά, οι ελληνικές μελέτες δείχνουν ότι η θερμοκρασία αποτελεί σημαντική, αλλά όχι ανεξάρτητη, παράμετρο της ποιότητας του αέρα. Η σχέση της με τις συγκεντρώσεις των ρύπων αλληλεπιδρά με την ηλιακή ακτινοβολία, τον άνεμο, τη σχετική υγρασία, τη βροχόπτωση, το ύψος του ατμοσφαιρικού οριακού στρώματος, τις τοπικές εκπομπές, τη θαλάσσια αύρα και τη γεωμορφολογία του λεκανοπεδίου. Παράλληλα, η συμπεριφορά διαφοροποιείται ανά ρύπο: το O_3 παρουσιάζει εντονότερη φωτοχημική και περιφερειακή συνιστώσα, τα NO και NO_2 επηρεάζονται περισσότερο από τις κυκλοφοριακές εκπομπές, τη χημική αλληλεπίδραση και τη διασπορά, το SO_2 από συγκεκριμένες πηγές και διαχρονικές μεταβολές των εκπομπών, ενώ τα PM_{10} από συνδυασμό τοπικών πηγών, επαναιώρησης, βροχόπτωσης και μεταφοράς σκόνης.

Οι βασικές ελληνικές μελέτες που σχετίζονται με το αντικείμενο της παρούσας εργασίας συνοψίζονται στον Πίνακα 2.2.

Μελέτη	Περιοχή	Ρύποι	Μετεωρολογικοί παράγοντες	Βασικό εύρημα
Grivas et al. (2004)	Αθήνα	PM ₁₀	Τοπική μετεωρολογία, διασπορά	Παρατηρήθηκαν έντονες χωρικές διαφοροποιήσεις των PM ₁₀ μεταξύ σταθμών διαφορετικού χαρακτήρα.
Grivas et al. (2008)	Αθήνα	PM ₁₀	Συνοπτική κυκλοφορία, μεταφορά σκόνης	Οι συγκεντρώσεις PM ₁₀ επηρεάζονται τόσο από τοπικές πηγές όσο και από μεταφορά σωματιδίων μεγάλης κλίμακας.
Mavroidis & Iliu (2012)	Αθήνα	NO _x , NO ₂ , O ₃	Εποχικότητα, τύπος σταθμού	Η συμπεριφορά των NO _x , NO ₂ και O ₃ διαφοροποιείται ανάλογα με την εγγύτητα στις πηγές και τη φωτοχημική αλληλεπίδραση.
Mavrakou et al. (2012)	Αθήνα	NO _x , O ₃	Θαλάσσια αύρα, συνοπτική κυκλοφορία	Η θαλάσσια αύρα και οι ζώνες σύγκλισης επηρεάζουν τη μεταφορά και τη συσσώρευση ρύπων στο βόρειο τμήμα του λεκανοπεδίου.
Founda & Santamouris (2017)	Αθήνα	Αστική θερμική νησίδα	Θερμοκρασία, άνεμος, θαλάσσια αύρα	Η ένταση της αστικής θερμικής νησίδας κατά τους καύσωνες εξαρτάται σημαντικά από το ανεμολογικό υπόβαθρο.
van der Schriek et al. (2020)	Αθήνα	Αστική θερμική νησίδα	Εποχή, ώρα ημέρας, θερμοκρασιακό καθεστώς	Η θερμική διαφοροποίηση μεταξύ αστικών και λιγότερο αστικοποιημένων θέσεων μεταβάλλεται χρονικά και εποχικά.
Liakakou et al. (2022)	Αθήνα	SO ₂ , HNO ₃ , HCl	Εποχικότητα, προέλευση αέριων μαζών	Οι συγκεντρώσεις επηρεάζονται από τις πηγές, τη μεταφορά και τις φυσικοχημικές μετατροπές.
Kalabokas et al. (2023)	Αθήνα	NO _x , O ₃ , O _x	Εποχικότητα, τύπος σταθμού	Διαπιστώθηκαν διαφοροποιήσεις μεταξύ πρωτογενούς και δευτερογενούς φωτοχημικής ρύπανσης και μεταξύ αστικών και περιφερειακών θέσεων.

Πίνακας 2.2 Ενδεικτικές μελέτες για τις μετεωρολογικές και χωροχρονικές συνθήκες που συνδέονται με την ατμοσφαιρική ρύπανση και το θερμοκρασιακό περιβάλλον της Αθήνας.

Η ελληνική βιβλιογραφία παρέχει σημαντικά στοιχεία για τη χωρική, εποχική και διαχρονική συμπεριφορά των ρύπων στην Αθήνα. Μεγάλο μέρος των προηγούμενων εργασιών επικεντρώνεται είτε σε συγκεκριμένο ρύπο είτε σε επιμέρους μηχανισμούς, όπως η φωτοχημεία, η θαλάσσια αύρα, η μεταφορά σκόνης ή η αστική θερμική νησίδα. Σε μικρότερο βαθμό έχει διερευνηθεί, με ενιαία μεθοδολογική προσέγγιση, η παράλληλη σχέση της θερμοκρασίας με πολλούς ρύπους, η σύγκριση σταθμών διαφορετικού χαρακτήρα και εποχών και η αντιπαράβολή των σχέσεων που προκύπτουν από τα απόλυτα ημερήσια επίπεδα με εκείνες που βασίζονται στις μεταβολές μεταξύ διαδοχικών ημερών. Το πεδίο αυτό συνδέεται άμεσα με το αντικείμενο και τη συμβολή της παρούσας εργασίας.

2.5.2 Διεθνείς μελέτες

Η διεθνής βιβλιογραφία έχει αναδείξει τη θερμοκρασία ως μία από τις σημαντικότερες μετεωρολογικές παραμέτρους που συνδέονται με τη μεταβολή της ποιότητας του αέρα. Η σύνδεση αυτή εκδηλώνεται μέσω της επίδρασης της θερμικής κατάστασης της ατμόσφαιρας στις χημικές αντιδράσεις, στις συνθήκες μεταφοράς και διασποράς, στις φυσικές και ανθρωπογενείς εκπομπές και στην εμφάνιση επεισοδίων αυξημένης ρύπανσης. Η κατεύθυνση και η ένταση της σχέσης δεν είναι ίδιες για όλους τους ρύπους, αλλά εξαρτώνται από την εποχή, το είδος και την ένταση των πηγών, τη γεωγραφική θέση, το χημικό καθεστώς και τις επικρατούσες μετεωρολογικές συνθήκες.

Οι Bernard et al. (2001) εξέτασαν σε ευρύτερο πλαίσιο τις πιθανές επιπτώσεις της κλιματικής μεταβολής στην ατμοσφαιρική ρύπανση και στη δημόσια υγεία. Η εργασία τους ανέδειξε ότι οι μεταβολές της θερμοκρασίας, της ατμοσφαιρικής κυκλοφορίας και των φυσικών εκπομπών μπορούν να επηρεάζουν ιδιαίτερα το τροποσφαιρικό O_3 και τα αιωρούμενα σωματίδια. Η μελέτη αποτελεί πρώιμη συνθετική προσέγγιση των συνδέσεων μεταξύ κλιματικής μεταβολής και ποιότητας του αέρα και όχι άμεση πειραματική διερεύνηση των επιμέρους μηχανισμών.

Μία από τις σημαντικότερες συνθετικές εργασίες στο συγκεκριμένο πεδίο είναι εκείνη των Jacob και Winner (2009), οι οποίοι αξιολόγησαν παρατηρησιακές μελέτες, πειράματα ευαισθησίας και προσομοιώσεις με κλιματικά και χημικά μοντέλα μεταφοράς. Οι συγγραφείς υπογράμμισαν ότι η ποιότητα του αέρα εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από τις

καιρικές συνθήκες και είναι, επομένως, ευαίσθητη στις μεταβολές του κλίματος. Η παρατηρούμενη θετική σχέση μεταξύ επιφανειακής θερμοκρασίας και O_3 σε ρυπασμένες περιοχές θεωρείται ένδειξη ότι η θέρμανση μπορεί να επιβαρύνει τη θερινή φωτοχημική ρύπανση. Αντίθετα, η απόκριση των αιωρούμενων σωματιδίων εμφανίζεται πιο σύνθετη και αβέβαιη, καθώς επηρεάζεται από τη βροχόπτωση, τη στασιμότητα, το ύψος του ατμοσφαιρικού οριακού στρώματος, τις πυρκαγιές και την κατανομή ημιπτητικών ενώσεων μεταξύ αέριας και σωματιδιακής φάσης.

Οι Coates et al. (2016) εξέτασαν ειδικότερα την επίδραση της θερμοκρασίας στην παραγωγή O_3 υπό διαφορετικές συνθήκες NO_x , χρησιμοποιώντας ιδεατοποιημένο μοντέλο ατμοσφαιρικής χημείας και διαφορετικούς χημικούς μηχανισμούς. Τα αποτελέσματα έδειξαν ότι η αύξηση της θερμοκρασίας μπορεί να ενισχύει την παραγωγή O_3 μέσω της επιτάχυνσης χημικών αντιδράσεων και της αύξησης των βιογενών εκπομπών ισοπρενίου. Παράλληλα, η μελέτη ανέδειξε ότι η σχέση O_3 –θερμοκρασίας είναι μη γραμμική και εξαρτάται ουσιαστικά από τις συγκεντρώσεις NO_x και τις συνθήκες ανάμιξης.

Μεγάλο μέρος της διεθνούς βιβλιογραφίας καταγράφει θετική στατιστική σχέση μεταξύ O_3 και θερμοκρασίας, ιδιαίτερα κατά τις θερμές και ηλιόλουστες περιόδους. Η ένταση της σχέσης διαφοροποιείται ανάλογα με τη διαθεσιμότητα NO_x και πτητικών οργανικών ενώσεων, το φωτοχημικό καθεστώς και τον χαρακτήρα της περιοχής. Σε σταθμούς κυκλοφοριακής επιβάρυνσης, οι υψηλές συγκεντρώσεις NO μπορούν να περιορίζουν το O_3 μέσω τιτλοδότησης, ενώ σε προαστιακές και περιαστικές περιοχές μπορεί να καταγράφονται υψηλότερα επίπεδα λόγω φωτοχημικής επεξεργασίας των αέριων μαζών και μειωμένης άμεσης κατανάλωσης από το NO . Η σχέση O_3 –θερμοκρασίας δεν είναι απαραίτητα γραμμική σε ολόκληρο το θερμοκρασιακό εύρος, καθώς σε πολύ υψηλές θερμοκρασίες μπορεί να μεταβάλλονται οι βιογενείς εκπομπές, η διαθεσιμότητα πρόδρομων ενώσεων, η ξηρή απόθεση και οι συνθήκες κυκλοφορίας.

Για το NO και το NO_2 , οι διεθνείς μελέτες αναφέρουν συχνά αρνητικές ή ασθενείς σχέσεις με τη θερμοκρασία όταν εξετάζονται ευρείες χρονικές περίοδοι. Οι χαμηλότερες θερμοκρασίες μπορεί να συμπίπτουν με αυξημένες εκπομπές από θέρμανση, συχνότερες ψυχρές εκκινήσεις των οχημάτων, ρηχότερο οριακό στρώμα και συνθήκες ατμοσφαιρικής σταθερότητας. Κατά τις θερμότερες περιόδους, η ανάπτυξη βαθύτερου οριακού στρώματος μπορεί να ευνοεί την αραίωση των εκπομπών, ενώ η αυξημένη φωτοχημική δραστηριότητα επιταχύνει τη μετατροπή και την ανακατανομή μεταξύ NO και NO_2 . Η τελική συμπεριφορά των οξειδίων του αζώτου διαφοροποιείται ανάλογα με τον τύπο της πόλης και του σταθμού,

καθώς σε θέσεις άμεσης κυκλοφοριακής επίδρασης οι τοπικές εκπομπές και ο αερισμός μπορεί να υπερισχύουν της σχέσης με τη θερμοκρασία.

Για τα αιωρούμενα σωματίδια, τα διεθνή ευρήματα εμφανίζονται λιγότερο ομοιόμορφα. Σε θερμές και ξηρές περιοχές μπορεί να καταγράφεται θετική σχέση μεταξύ θερμοκρασίας και PM_{10} λόγω της ξηρότητας των επιφανειών, της επαναιώρησης οδικής και εδαφικής σκόνης, των δασικών πυρκαγιών και της μεταφοράς ορυκτών σωματιδίων. Σε άλλες περιοχές παρατηρούνται υψηλότερες συγκεντρώσεις PM κατά τις ψυχρές περιόδους, λόγω οικιακής θέρμανσης, καύσης βιομάζας, ρηχότερου οριακού στρώματος και ευνοϊκότερης παραμονής ημιπτητικών ενώσεων στη σωματιδιακή φάση. Η θερμοκρασία μπορεί επίσης να επηρεάζει διαφορετικά το χονδρόκοκκο και το λεπτόκοκκο κλάσμα, γεγονός που δυσχεραίνει τη σύγκριση μεταξύ μελετών που εξετάζουν PM_{10} , $PM_{2.5}$ ή τη χημική σύσταση των σωματιδίων.

Για το SO_2 , οι διεθνείς μελέτες δείχνουν ότι οι συγκεντρώσεις επηρεάζονται έντονα από τη θέση, το ύψος και τη λειτουργία των βιομηχανικών, ενεργειακών και ναυτιλιακών πηγών, από την περιεκτικότητα των καυσίμων σε θείο και από τη διεύθυνση του ανέμου. Σε περιοχές όπου η χρήση θειούχων καυσίμων για θέρμανση παραμένει σημαντική, μπορεί να εμφανίζεται αρνητική σχέση με τη θερμοκρασία λόγω αυξημένων χειμερινών εκπομπών και περιορισμένης διασποράς. Η σχέση αυτή δεν αποτελεί καθολικό πρότυπο, καθώς σε βιομηχανικά επηρεασμένες περιοχές οι συγκεντρώσεις SO_2 μπορεί να καθορίζονται κυρίως από τη λειτουργία συγκεκριμένων εγκαταστάσεων και τη μεταφορά των εκπομπών προς τον σταθμό.

Η διεθνής βιβλιογραφία αναδεικνύει ακόμη τη σημασία της χρονικής κλίμακας και της μεθοδολογικής προσέγγισης. Οι πολυετείς, ετήσιες ή εποχικές μέσες τιμές αποτυπώνουν περισσότερο την ευρύτερη εποχικότητα, τις μακροχρόνιες μεταβολές των εκπομπών και τα περιφερειακά κλιματικά πρότυπα. Αντίθετα, οι ημερήσιες και ωριαίες αναλύσεις μπορούν να αναδείξουν βραχυχρόνιες αποκρίσεις στη θερμοκρασία, στην ακτινοβολία, στον άνεμο και στο ύψος ανάμιξης. Οι ημερήσιες μέσες τιμές εξομαλύνουν τον ενδοημερήσιο κύκλο των εκπομπών και της φωτοχημείας, ενώ οι ωριαίες τιμές αποτυπώνουν καλύτερα τις ώρες αιχμής της κυκλοφορίας και τις απογευματινές μέγιστες συγκεντρώσεις O_3 .

Σημαντική διαφοροποίηση υπάρχει επίσης μεταξύ των μελετών που χρησιμοποιούν απλούς συντελεστές συσχέτισης και εκείνων που εφαρμόζουν πολυμεταβλητά, μη γραμμικά ή χρονοσειριακά μοντέλα. Οι απλές συσχετίσεις είναι χρήσιμες για την αρχική αποτύπωση της κατεύθυνσης, της έντασης και της στατιστικής σημαντικότητας μιας σχέσης, αλλά δεν

επιτρέπουν την απομόνωση της θερμοκρασίας από μεταβλητές που μεταβάλλονται ταυτόχρονα. Τα πιο σύνθετα μοντέλα μπορούν να ενσωματώνουν περισσότερες παραμέτρους και να διερευνούν κατώφλια, χρονικές υστερήσεις και αλληλεπιδράσεις, αλλά η ερμηνεία τους εξαρτάται από την ποιότητα των δεδομένων, την επιλογή των μεταβλητών και τις στατιστικές παραδοχές.

Συνολικά, η διεθνής βιβλιογραφία αναδεικνύει τη θερμοκρασία ως σημαντική, αλλά όχι αποκλειστική, παράμετρο διαμόρφωσης της ποιότητας του αέρα. Η σχέση εμφανίζεται συχνά θετική και εντονότερη για το O_3 , λόγω της φωτοχημικής φύσης του. Για το NO και το NO_2 καταγράφονται συχνά αρνητικές ή ασθενείς σχέσεις σε ευρείες χρονικές κλίμακες, οι οποίες επηρεάζονται από τις εκπομπές, τη διασπορά και τη φωτοχημική ανακατανομή. Για το SO_2 η συμπεριφορά εξαρτάται έντονα από τις τοπικές πηγές και τη μακροχρόνια εξέλιξη των εκπομπών, ενώ για τα αιωρούμενα σωματίδια τα ευρήματα παραμένουν περισσότερο σύνθετα και χωρικά ανομοιογενή.

Οι αποκλίσεις μεταξύ των διεθνών μελετών υπογραμμίζουν τη σημασία της γεωγραφικής περιοχής, της εποχής, του τύπου του σταθμού, της χρονικής ανάλυσης και της μεθοδολογικής προσέγγισης. Η στατιστική σχέση θερμοκρασίας-ρύπων δεν μπορεί να μεταφέρεται αυτούσια από μία πόλη σε άλλη, επειδή διαφοροποιούνται οι πηγές, το κλίμα, η τοπογραφία, η αστική μορφολογία και η χημική σύσταση της ατμόσφαιρας. Η ανάγκη τοπικής διερεύνησης είναι ιδιαίτερα σημαντική για το λεκανοπέδιο της Αθήνας, όπου συνυπάρχουν σταθμοί κυκλοφοριακής επιβάρυνσης, αστικού υποβάθρου, προαστιακού, περιαστικού και βιομηχανικά επηρεασμένου χαρακτήρα, καθώς και σύνθετες συνθήκες μεταφοράς λόγω της τοπογραφίας και της θαλάσσιας αύρας.

2.6 Ερευνητικό κενό και σύνδεση με την παρούσα εργασία

Η ανασκόπηση της ελληνικής και διεθνούς βιβλιογραφίας δείχνει ότι η σχέση μεταξύ θερμοκρασίας και ατμοσφαιρικής ρύπανσης έχει διερευνηθεί εκτενώς, χωρίς να προκύπτει ενιαίο και σταθερό πρότυπο για όλους τους ρύπους, τις εποχές και τις γεωγραφικές περιοχές. Η κατεύθυνση και η ένταση των παρατηρούμενων σχέσεων διαφοροποιούνται ανάλογα με τις φυσικοχημικές ιδιότητες κάθε ρύπου, τις πηγές εκπομπής, τον τύπο του

σταθμού, τη χρονική κλίμακα της ανάλυσης, τη μεθοδολογική προσέγγιση και τα ιδιαίτερα χαρακτηριστικά του αστικού περιβάλλοντος.

Παρά τον σημαντικό αριθμό σχετικών μελετών, παραμένει περιορισμένη η συστηματική και συγκριτική διερεύνηση πολλαπλών ατμοσφαιρικών ρύπων με ταυτόχρονη διάκριση ανά εποχή, σταθμό και χρονική κλίμακα. Πολλές προηγούμενες εργασίες επικεντρώνονται είτε σε συγκεκριμένους ρύπους είτε σε περιορισμένο αριθμό σταθμών και εξετάζουν κυρίως τις απόλυτες συγκεντρώσεις τους. Λιγότερο συχνή είναι η παράλληλη ανάλυση των ημερήσιων μέσων τιμών και των διαφορών μεταξύ πραγματικά διαδοχικών ημερών με ενιαία μεθοδολογική προσέγγιση και κοινά κριτήρια σύγκρισης.

Η διάκριση αυτή είναι ουσιώδης, επειδή οι ημερήσιες μέσες τιμές μπορεί να αποτυπώνουν σε σημαντικό βαθμό την κοινή εποχική διακύμανση της θερμοκρασίας και των συγκεντρώσεων των ρύπων, ενώ οι πρώτες διαφορές επικεντρώνονται περισσότερο στη βραχυχρόνια συν-μεταβολή τους. Οι δύο προσεγγίσεις είναι συμπληρωματικές και επιτρέπουν να εξεταστεί αν οι σχέσεις που εμφανίζονται στις απόλυτες τιμές διατηρούνται όταν περιορίζεται η επίδραση των αργών χρονικών και εποχικών μεταβολών. Παράλληλα, η σύγκρισή τους συμβάλλει στη διάκριση μεταξύ ευρύτερων εποχικών προτύπων και πιο άμεσων ημερήσιων μεταβολών.

Η ανάγκη τοπικής διερεύνησης είναι ιδιαίτερα σημαντική για το λεκανοπέδιο της Αθήνας, όπου συνυπάρχουν σταθμοί κυκλοφοριακής επιβάρυνσης, αστικού υποβάθρου, προαστιακού, περιαστικού και βιομηχανικά επηρεασμένου χαρακτήρα. Παράλληλα, η τοπογραφία του λεκανοπεδίου, η γειτνίαση με τη θάλασσα, η ανάπτυξη της θαλάσσιας αύρας, η αστική θερμική νησίδα και οι διαφοροποιήσεις στις τοπικές πηγές εκπομπής δημιουργούν σύνθετες συνθήκες μεταφοράς, διασποράς και φωτοχημικού μετασχηματισμού των ρύπων. Επομένως, τα ευρήματα από άλλες γεωγραφικές περιοχές δεν μπορούν να μεταφερθούν αυτομάτως στο αθηναϊκό περιβάλλον χωρίς ειδικότερη διερεύνηση.

Η παρούσα εργασία επιχειρεί να συμβάλει στην κάλυψη αυτού του κενού μέσω της συγκριτικής ανάλυσης των NO, NO₂, O₃, PM₁₀ και SO₂ στο λεκανοπέδιο της Αθήνας κατά την περίοδο 2016–2024. Η διερεύνηση πραγματοποιείται χωριστά ανά ρύπο, εποχή και σταθμό διαφορετικού χωρικού και λειτουργικού χαρακτήρα και συνδυάζει δύο αναλυτικές προσεγγίσεις: τη σχέση μεταξύ ημερήσιας μέσης θερμοκρασίας και ημερήσιων μέσων συγκεντρώσεων και τη σχέση μεταξύ των αντίστοιχων μεταβολών από ημέρα σε ημέρα.

Με τον τρόπο αυτό επιδιώκεται η συστηματική αποτύπωση της εποχικής, χωρικής και βραχυχρόνιας διαφοροποίησης των εξεταζόμενων σχέσεων. Η κοινή εφαρμογή των ίδιων στατιστικών μεθόδων σε όλους τους ρύπους και σταθμούς διευκολύνει την άμεση σύγκριση των αποτελεσμάτων και τον εντοπισμό ομοιοτήτων, διαφορών και πιθανών εξαιρέσεων.

Η συμβολή της εργασίας εντοπίζεται, επομένως, στη συνδυασμένη εξέταση πέντε ρύπων, διαφορετικών τύπων σταθμών, εποχικών προτύπων και δύο χρονικών αναπαραστάσεων των δεδομένων στο πλαίσιο μιας κοινής περιόδου μελέτης. Η προσέγγιση αυτή επιτρέπει μια περισσότερο ολοκληρωμένη και χωρικά διαφοροποιημένη αξιολόγηση της σχέσης μεταξύ θερμοκρασίας και ποιότητας του αέρα στο αθηναϊκό λεκανοπέδιο, χωρίς οι παρατηρούμενες στατιστικές σχέσεις να ερμηνεύονται ως άμεσες αιτιώδεις επιδράσεις.

3. Μεθοδολογία

3.1 Μεθοδολογικός σχεδιασμός της έρευνας

Η παρούσα εργασία ακολουθεί ποσοτική και εφαρμοσμένη μεθοδολογική προσέγγιση, βασισμένη στην επεξεργασία και τη στατιστική ανάλυση χρονοσειρών θερμοκρασίας και ατμοσφαιρικής ρύπανσης. Αντικείμενο της ανάλυσης αποτελεί η διερεύνηση της σχέσης μεταξύ θερμοκρασίας και συγκεντρώσεων των ατμοσφαιρικών ρύπων NO, NO₂, O₃, PM₁₀ και SO₂ σε επιλεγμένους σταθμούς του λεκανοπεδίου της Αθήνας κατά την περίοδο 2016–2024.

Ο μεθοδολογικός σχεδιασμός στηρίχθηκε σε δύο συμπληρωματικές αναλυτικές προσεγγίσεις. Η πρώτη εξέτασε τη σχέση μεταξύ της ημερήσιας μέσης θερμοκρασίας και των αντίστοιχων ημερήσιων μέσων συγκεντρώσεων των ρύπων. Η προσέγγιση αυτή αποτυπώνει τις σχέσεις που εμφανίζονται στις απόλυτες ημερήσιες τιμές, στις οποίες ενσωματώνονται οι ευρύτερες χρονικές και εποχικές διακυμάνσεις των εξεταζόμενων μεταβλητών.

Η δεύτερη προσέγγιση επικεντρώθηκε στις μεταβολές μεταξύ διαδοχικών ημερών. Εξετάστηκε, δηλαδή, κατά πόσο η αύξηση ή η μείωση της θερμοκρασίας από τη μία ημέρα στην επόμενη συνοδεύεται από αντίστοιχη μεταβολή στη συγκέντρωση κάθε ρύπου. Με τον τρόπο αυτό επιχειρήθηκε η διάκριση των ευρύτερων σχέσεων, που περιλαμβάνουν την εποχική συνδιακύμανση, από τις βραχυχρόνιες συν-μεταβολές της θερμοκρασίας και της ατμοσφαιρικής ρύπανσης.

Η μεθοδολογική διαδικασία περιλάμβανε τη συλλογή δεδομένων ατμοσφαιρικής ρύπανσης και θερμοκρασίας, την αντιστοίχιση σταθμών μέτρησης, τον καθαρισμό και την ομογενοποίηση των χρονοσειρών, τον υπολογισμό ημερήσιων μέσων τιμών, τον υπολογισμό μεταβολών μεταξύ διαδοχικών ημερών και την εποχική ταξινόμηση των παρατηρήσεων. Στη συνέχεια εφαρμόστηκαν περιγραφική στατιστική, ανάλυση συσχέτισης και απλή γραμμική παλινδρόμηση, χωριστά ανά ρύπο, σταθμό και εποχή.

Ο σχεδιασμός της έρευνας αποσκοπεί στην αποτύπωση στατιστικών σχέσεων και όχι στην τεκμηρίωση άμεσης αιτιώδους επίδρασης της θερμοκρασίας στις συγκεντρώσεις των ρύπων. Οι παρατηρούμενες σχέσεις ερμηνεύονται λαμβάνοντας υπόψη ότι η ποιότητα του αέρα επηρεάζεται ταυτόχρονα από τις τοπικές εκπομπές, τις συνθήκες ατμοσφαιρικής διασποράς, τη φωτοχημική δραστηριότητα και άλλες μετεωρολογικές μεταβλητές, οι οποίες δεν περιλαμβάνονται ως ανεξάρτητες μεταβλητές στα εφαρμοζόμενα διμεταβλητά μοντέλα.

Κατά συνέπεια, τα αποτελέσματα αποτυπώνουν τη στατιστική συνδιακύμανση των εξεταζόμενων μεταβλητών εντός του συγκεκριμένου χωρικού, χρονικού και μεθοδολογικού πλαισίου.

3.2 Περιοχή μελέτης και σταθμοί ατμοσφαιρικής ρύπανσης

3.2.1 Η Αθήνα ως περιοχή μελέτης

Η περιοχή μελέτης της παρούσας εργασίας περιλαμβάνει το λεκανοπέδιο της Αθήνας και επιλεγμένες περιοχές της ευρύτερης Αττικής. Πρόκειται για ένα σύνθετο μεσογειακό αστικό περιβάλλον, στο οποίο η ποιότητα του αέρα διαμορφώνεται από την αλληλεπίδραση ανθρωπογενών εκπομπών, γεωμορφολογικών χαρακτηριστικών και έντονης εποχικής μεταβλητότητας των μετεωρολογικών συνθηκών.

Η ευρύτερη μητροπολιτική περιοχή χαρακτηρίζεται από υψηλό βαθμό αστικοποίησης, μεγάλη πληθυσμιακή πυκνότητα και έντονη συγκέντρωση δραστηριοτήτων. Η οδική κυκλοφορία αποτελεί σημαντική πηγή εκπομπών οξειδίων του αζώτου και αιωρούμενων σωματιδίων, ιδιαίτερα στον κεντρικό και κυκλοφοριακά επιβαρυνόμενο αστικό ιστό. Παράλληλα, στη δυτική Αττική αναπτύσσονται βιομηχανικές, ενεργειακές και λιμενικές δραστηριότητες, οι οποίες μπορεί να συμβάλλουν στη διαμόρφωση των συγκεντρώσεων πρωτογενών ρύπων, όπως το SO_2 , τα NO_x και τα αιωρούμενα σωματίδια.

Σημαντικό ρόλο στις συνθήκες μεταφοράς και διασποράς διαδραματίζει η γεωμορφολογία της περιοχής. Το λεκανοπέδιο περιβάλλεται από τους ορεινούς όγκους της Πάρνηθας, της Πεντέλης, του Υμηττού και του Αιγάλεω, ενώ προς τα νότια γειτνιάζει με τον Σαρωνικό Κόλπο. Ο συνδυασμός αυτός επηρεάζει τη ροή και την ανανέωση των αέριων μαζών και συμβάλλει στη διαμόρφωση τοπικών συστημάτων κυκλοφορίας, όπως η θαλάσσια αύρα.

Η περιοχή παρουσιάζει σημαντική χωρική ανομοιογένεια. Οι κεντρικές πυκνοδομημένες και κυκλοφοριακά επιβαρυνμένες ζώνες διαφοροποιούνται ως προς τις πηγές εκπομπής και τις συνθήκες αερισμού από τις προαστιακές, περιαστικές και βιομηχανικά επηρεασμένες περιοχές. Η διαφοροποίηση αυτή καθιστά αναγκαία τη σύγκριση σταθμών διαφορετικού χωρικού και λειτουργικού χαρακτήρα.

Η συνύπαρξη διαφορετικών πηγών εκπομπής, σύνθετης τοπογραφίας, υψηλού βαθμού αστικοποίησης και έντονης εποχικής μεταβλητότητας καθιστά την Αθήνα και την ευρύτερη Αττική κατάλληλο πεδίο για τη στατιστική διερεύνηση της σχέσης μεταξύ θερμοκρασίας και ποιότητας του αέρα. Παράλληλα, η διαθεσιμότητα χρονοσειρών από σταθμούς διαφορετικού χαρακτήρα επιτρέπει τη συγκριτική εξέταση των χωρικών και εποχικών διαφοροποιήσεων των εξεταζόμενων σχέσεων.

3.2.2 Επιλογή και χαρακτηριστικά των σταθμών ατμοσφαιρικής ρύπανσης

Για τις ανάγκες της παρούσας έρευνας χρησιμοποιήθηκαν δεδομένα από πέντε σταθμούς του Εθνικού Δικτύου Παρακολούθησης Ατμοσφαιρικής Ρύπανσης (ΕΔΠΑΡ): την Αριστοτέλους, την Πατησίων, την Ελευσίνα, τη Λυκόβρυση και τους Θρακομακεδόνες. Οι σταθμοί επιλέχθηκαν ώστε να αντιπροσωπεύουν διαφορετικές χωρικές και λειτουργικές συνθήκες στην ευρύτερη περιοχή της Αττικής, περιλαμβάνοντας αστικό υπόβαθρο, κυκλοφοριακά επιβαρυνόμενο, προαστιακό, περιαστικό και βιομηχανικά επηρεασμένο περιβάλλον.

Η επιλογή βασίστηκε στη χωρική κατανομή των σταθμών, στον λειτουργικό χαρακτήρα των περιοχών όπου βρίσκονται, στη διαφοροποίηση των κύριων πηγών εκπομπής, στη διαθεσιμότητα μετρήσεων για τους εξεταζόμενους ρύπους και στην επάρκεια των χρονοσειρών για την περίοδο 2016–2024. Παράλληλα, επιδιώχθηκε να καταστεί δυνατή η σύγκριση μεταξύ περιοχών που επηρεάζονται σε διαφορετικό βαθμό από την οδική κυκλοφορία, τη γενικότερη αστική επιβάρυνση, τη βιομηχανική δραστηριότητα, την περιφερειακή μεταφορά και τις φωτοχημικές διεργασίες.

Ο σταθμός της Αριστοτέλους αντιπροσωπεύει συνθήκες αστικού υποβάθρου στο κεντρικό τμήμα της Αθήνας και αποτυπώνει τη συνδυασμένη επίδραση διαφορετικών αστικών πηγών. Ο σταθμός της Πατησίων χαρακτηρίζεται από έντονη κυκλοφοριακή επιβάρυνση και είναι κατάλληλος για την εξέταση της συμπεριφοράς πρωτογενών και κυκλοφοριακά συνδεδεμένων ρύπων στον αστικό πυρήνα. Ο σταθμός της Ελευσίνας βρίσκεται σε βιομηχανικά επηρεασμένη περιοχή, όπου αναπτύσσονται επίσης ενεργειακές και λιμενικές δραστηριότητες. Η Λυκόβρυση αντιπροσωπεύει προαστιακές συνθήκες, ενώ οι Θρακομακεδόνες αντιπροσωπεύουν περιαστικό περιβάλλον, στο οποίο η περιφερειακή μεταφορά και οι φωτοχημικές διεργασίες μπορεί να αποκτούν μεγαλύτερη σημασία.

Τα βασικά χαρακτηριστικά και ο ερμηνευτικός ρόλος των επιλεγμένων σταθμών στην παρούσα εργασία παρουσιάζονται στον Πίνακα 3.1.

Σταθμός ΕΔΠΑΡ	Χαρακτηρισμός	Ερμηνευτικός ρόλος στην εργασία
Αριστοτέλους	Αστικού υποβάθρου	Αντιπροσωπεύει το κεντρικό αστικό περιβάλλον και τη συνδυασμένη επίδραση διαφορετικών αστικών πηγών.
Πατησίων	Κυκλοφορίας	Αποτυπώνει συνθήκες έντονης κυκλοφοριακής επιβάρυνσης στον αστικό πυρήνα και τη συμπεριφορά πρωτογενών ρύπων.
Ελευσίνα	Βιομηχανικός	Επιτρέπει τη διερεύνηση ρύπων σε περιοχή με βιομηχανικές, ενεργειακές και λιμενικές δραστηριότητες.
Λυκόβρυση	Προαστιακός	Αποτυπώνει προαστιακές συνθήκες, όπου η μεταφορά και η διασπορά των ρύπων μπορεί να αποκτούν μεγαλύτερη σημασία.
Θρακομακεδόνες	Περιαστικός	Αντιπροσωπεύει περιαστικό περιβάλλον, με πιθανή αυξημένη σημασία της περιφερειακής μεταφοράς και της φωτοχημικής δραστηριότητας.

Πίνακας 3.1. Σταθμοί ΕΔΠΑΡ που χρησιμοποιήθηκαν στην παρούσα εργασία και ερμηνευτικός τους ρόλος.

Η συνδυαστική χρήση των πέντε σταθμών επιτρέπει τη διερεύνηση της σχέσης μεταξύ θερμοκρασίας και ατμοσφαιρικής ρύπανσης υπό διαφορετικές χωρικές και λειτουργικές συνθήκες. Η κατηγοριοποίηση των σταθμών χρησιμοποιείται ως λειτουργικό πλαίσιο για

τη συγκριτική ερμηνεία των αποτελεσμάτων και όχι ως απόλυτος διαχωρισμός των πηγών που επηρεάζουν κάθε θέση.

3.3 Πηγές, χαρακτηριστικά και χρονική περίοδος δεδομένων

Η παρούσα έρευνα βασίστηκε σε δεδομένα από δύο επίσημους εθνικούς φορείς που πραγματοποιούν συστηματική παρακολούθηση της ποιότητας του αέρα και των μετεωρολογικών συνθηκών στην Ελλάδα. Ειδικότερα, χρησιμοποιήθηκαν δεδομένα ατμοσφαιρικής ρύπανσης από το Εθνικό Δίκτυο Παρακολούθησης Ατμοσφαιρικής Ρύπανσης (ΕΔΠΑΡ) και δεδομένα θερμοκρασίας του αέρα από την Εθνική Μετεωρολογική Υπηρεσία (ΕΜΥ). Η χρήση επίσημων πηγών κρίθηκε απαραίτητη, καθώς εξασφαλίζει μεγαλύτερη συνέπεια, θεσμική αξιοπιστία και συγκρισιμότητα των χρονοσειρών.

Το ΕΔΠΑΡ αποτέλεσε την πηγή των δεδομένων ατμοσφαιρικής ρύπανσης για τους εξεταζόμενους ρύπους NO, NO₂, O₃, PM₁₀ και SO₂ στους επιλεγμένους σταθμούς της Αττικής. Τα μετεωρολογικά δεδομένα της ΕΜΥ χρησιμοποιήθηκαν για τον χαρακτηρισμό των ημερήσιων θερμοκρασιακών συνθηκών, καθώς η θερμοκρασία αποτελεί την κύρια μετεωρολογική μεταβλητή της παρούσας εργασίας και τον βασικό άξονα της στατιστικής διερεύνησης.

Τα δεδομένα των δύο φορέων υποβλήθηκαν σε προεπεξεργασία και οργανώθηκαν σε κοινή ημερήσια χρονική βάση, ώστε κάθε διαθέσιμη ημερήσια τιμή θερμοκρασίας να αντιστοιχιστεί με την αντίστοιχη ημερήσια συγκέντρωση του εξεταζόμενου ρύπου. Ο συνδυασμός των δύο κατηγοριών δεδομένων επέτρεψε τη διερεύνηση των στατιστικών σχέσεων μεταξύ θερμοκρασίας και ατμοσφαιρικής ρύπανσης στο λεκανοπέδιο της Αθήνας και στην ευρύτερη περιοχή της Αττικής κατά την περίοδο 2016–2024.

3.3.1 Δεδομένα ατμοσφαιρικής ρύπανσης από το ΕΔΠΑΡ

Τα δεδομένα ατμοσφαιρικής ρύπανσης προήλθαν από την επίσημη διαδικτυακή πλατφόρμα του Υπουργείου Περιβάλλοντος και Ενέργειας και ειδικότερα από την ενότητα «Δεδομένα

Μετρήσεων Ατμοσφαιρικής Ρύπανσης», στην οποία διατίθενται ιστορικές παρατηρήσεις από τους σταθμούς του Εθνικού Δικτύου Παρακολούθησης Ατμοσφαιρικής Ρύπανσης.

Στην παρούσα εργασία χρησιμοποιήθηκαν διαθέσιμες μετρήσεις για τους ρύπους NO, NO₂, O₃, PM₁₀ και SO₂. Οι ρύποι αυτοί επιλέχθηκαν επειδή αποτελούν βασικούς δείκτες της ποιότητας του αέρα, συνδέονται με διαφορετικές πηγές εκπομπής και μηχανισμούς ατμοσφαιρικής συμπεριφοράς και παρουσιάζουν επαρκή διαθεσιμότητα δεδομένων στους επιλεγμένους σταθμούς για την εξεταζόμενη περίοδο.

Οι συγκεντρώσεις των ρύπων αποτέλεσαν τις μεταβλητές ατμοσφαιρικής ρύπανσης της ανάλυσης και εξετάστηκαν σε σχέση με τη θερμοκρασία σε δύο μορφές: ως ημερήσιες μέσες τιμές και ως μεταβολές μεταξύ διαδοχικών ημερών. Η πρώτη μορφή χρησιμοποιήθηκε για την αποτύπωση των σχέσεων που εμφανίζονται στα ημερήσια επίπεδα θερμοκρασίας και ρύπανσης, ενώ η δεύτερη για την εξέταση των βραχυχρόνιων συν-μεταβολών.

Η διαθεσιμότητα των ρύπων δεν ήταν ίδια σε όλους τους σταθμούς. Για τον λόγο αυτό, κάθε ανάλυση πραγματοποιήθηκε μόνο για τους συνδυασμούς σταθμού και ρύπου για τους οποίους υπήρχαν επαρκή και κατάλληλα δεδομένα. Η επιλογή αυτή αποτρέπει τη χρήση ελλιπών ή μη συγκρίσιμων χρονοσειρών και ενισχύει την αξιοπιστία των επιμέρους στατιστικών αποτελεσμάτων.

Πριν από τη στατιστική επεξεργασία, οι χρονοσειρές ελέγχθηκαν ως προς την πληρότητα, την παρουσία ελλειπυσών ή μη έγκυρων τιμών και τη συμβατότητα της μορφής των αρχείων μεταξύ διαφορετικών ετών, σταθμών και ρύπων. Μετά τον έλεγχο και τον καθαρισμό, οι διαθέσιμες παρατηρήσεις οργανώθηκαν σε ενιαίες χρονοσειρές ανά σταθμό και ρύπο και μετατράπηκαν σε κοινή ημερήσια χρονική βάση. Η αναλυτική διαδικασία προεπεξεργασίας παρουσιάζεται στην Ενότητα 3.5.

3.3.2 Μετεωρολογικά δεδομένα από την EMY

Τα μετεωρολογικά δεδομένα της παρούσας έρευνας προήλθαν από την Εθνική Μετεωρολογική Υπηρεσία, η οποία αποτελεί τον αρμόδιο εθνικό φορέα για τη συλλογή, τον ποιοτικό έλεγχο, την επεξεργασία και τη διάθεση μετεωρολογικών και κλιματολογικών παρατηρήσεων στην Ελλάδα.

Στην παρούσα εργασία αξιοποιήθηκαν αποκλειστικά διαθέσιμα δεδομένα θερμοκρασίας του αέρα, καθώς η θερμοκρασία αποτελεί την κύρια μετεωρολογική μεταβλητή της διερεύνησης και συνδέεται άμεσα με τα ερευνητικά ερωτήματα της εργασίας. Τα θερμοκρασιακά δεδομένα προήλθαν από τους μετεωρολογικούς σταθμούς της ΕΜΥ στην Ελευσίνα, στο Ελληνικό και στο Τατόι.

Οι συγκεκριμένοι σταθμοί επιλέχθηκαν με βάση τη γεωγραφική τους θέση, τη δυνατότητα αντιστοίχισής τους με τους επιλεγμένους σταθμούς ατμοσφαιρικής ρύπανσης και τη διαθεσιμότητα επαρκών χρονοσειρών για την εξεταζόμενη περίοδο. Η αναλυτική αντιστοίχιση μεταξύ των σταθμών της ΕΜΥ και του ΕΔΠΑΡ παρουσιάζεται στην Ενότητα 3.4.

Οι αρχικές θερμοκρασιακές παρατηρήσεις ελέγχθηκαν ως προς τη χρονική μορφή, την πληρότητα και την παρουσία ελλειπουσών ή μη έγκυρων τιμών. Στη συνέχεια οργανώθηκαν σε ημερήσια βάση, ώστε να είναι χρονικά συμβατές με τις αντίστοιχες ημερήσιες συγκεντρώσεις των ατμοσφαιρικών ρύπων.

Παρότι η ΕΜΥ καταγράφει και άλλες μετεωρολογικές μεταβλητές, όπως ο άνεμος, η σχετική υγρασία, η βροχόπτωση και η ηλιοφάνεια, οι παράμετροι αυτές δεν εντάχθηκαν στα εφαρμοζόμενα στατιστικά υποδείγματα. Η επιλογή αυτή συνδέεται με τον σκοπό της εργασίας, ο οποίος εστιάζει ειδικά στη διμεταβλητή σχέση της θερμοκρασίας με κάθε εξεταζόμενο ρύπο. Ωστόσο, αποτελεί και βασικό περιορισμό της ανάλυσης, καθώς δεν επιτρέπει την απομόνωση της επίδρασης της θερμοκρασίας από την ταυτόχρονη επίδραση άλλων μετεωρολογικών παραγόντων.

3.3.3 Επιλογή μεταβλητών και χρονική περίοδος της μελέτης

Η επιλογή των μεταβλητών βασίστηκε στον σκοπό και στα ερευνητικά ερωτήματα της παρούσας εργασίας. Η ανάλυση οργανώθηκε γύρω από τη διερεύνηση της στατιστικής σχέσης της θερμοκρασίας του αέρα με τις συγκεντρώσεις των ατμοσφαιρικών ρύπων NO, NO₂, O₃, PM₁₀ και SO₂. Η θερμοκρασία του αέρα εξετάστηκε σε δύο μορφές: ως ημερήσια μέση θερμοκρασία και ως μεταβολή μεταξύ διαδοχικών ημερών. Αντίστοιχα, για κάθε ατμοσφαιρικό ρύπο χρησιμοποιήθηκαν η ημερήσια μέση συγκέντρωση και η μεταβολή της συγκέντρωσης σε σχέση με την αμέσως προηγούμενη ημερολογιακή ημέρα. Με τον τρόπο αυτό διαμορφώθηκαν δύο βασικά ζεύγη μεταβλητών για τη στατιστική ανάλυση: η

ημερήσια μέση θερμοκρασία με την ημερήσια συγκέντρωση του ρύπου και η ημερήσια μεταβολή της θερμοκρασίας με την ημερήσια μεταβολή της συγκέντρωσης του ρύπου.

Στις αναλύσεις απλής γραμμικής παλινδρόμησης, η θερμοκρασία ή η μεταβολή της χρησιμοποιήθηκε ως ανεξάρτητη μεταβλητή, ενώ η αντίστοιχη συγκέντρωση ή μεταβολή της συγκέντρωσης κάθε ρύπου χρησιμοποιήθηκε ως εξαρτημένη μεταβλητή. Στις αναλύσεις συσχέτισης εξετάστηκε η κατεύθυνση και η ένταση της στατιστικής συνδιακύμανσης μεταξύ των αντίστοιχων ζευγών μεταβλητών, χωρίς η σχέση αυτή να ερμηνεύεται ως αιτιώδης. Ο σταθμός μέτρησης και η εποχή του έτους χρησιμοποιήθηκαν ως μεταβλητές ομαδοποίησης των παρατηρήσεων. Οι στατιστικές αναλύσεις πραγματοποιήθηκαν χωριστά ανά σταθμό, ρύπο και εποχή, ώστε να διερευνηθούν οι χωρικές και εποχικές διαφοροποιήσεις των σχέσεων. Οι μεταβλητές αυτές δεν εισήχθησαν ως ανεξάρτητοι όροι σε πολυμεταβλητά μοντέλα, αλλά χρησιμοποιήθηκαν για τη στρωματοποίηση και τη συγκριτική παρουσίαση των αποτελεσμάτων.

Η χρονική περίοδος της μελέτης καλύπτει τα έτη 2016–2024. Η περίοδος αυτή επιλέχθηκε επειδή παρέχει πολυετή βάση παρατηρήσεων, επιτρέπει τη σύγκριση διαφορετικών εποχών και σταθμών και περιλαμβάνει επαρκή αριθμό ημερήσιων δεδομένων για την εφαρμογή των στατιστικών αναλύσεων. Κάθε επιμέρους ανάλυση πραγματοποιήθηκε μόνο για τους συνδυασμούς σταθμού και ρύπου που πληρούσαν τα κριτήρια διαθεσιμότητας και καταλληλότητας των δεδομένων. Το μονοξείδιο του άνθρακα (CO) και τα αιωρούμενα σωματίδια PM_{2.5} δεν συμπεριλήφθηκαν στην τελική στατιστική ανάλυση, λόγω της περιορισμένης διαθεσιμότητας συνεχών και συγκρίσιμων ημερήσιων δεδομένων για το σύνολο των επιλεγμένων σταθμών και της εξεταζόμενης περιόδου. Η αναφορά τους στο θεωρητικό μέρος της εργασίας διατηρήθηκε λόγω της σημασίας τους για την αξιολόγηση της ποιότητας του αέρα, χωρίς να αποτελούν μεταβλητές της εμπειρικής διερεύνησης.

Πηγή δεδομένων	Είδος δεδομένων	Μεταβλητές	Χρήση στην εργασία
ΕΔΠΑΡ / ΥΠΕΝ	Δεδομένα ατμοσφαιρικής ρύπανσης	NO, NO ₂ , O ₃ , PM ₁₀ , SO ₂	Μεταβλητές ατμοσφαιρικής ρύπανσης
ΕΜΥ	Μετεωρολογικά δεδομένα	Θερμοκρασία αέρα (°C)	Κύρια μετεωρολογική μεταβλητή
Παράγωγες μεταβλητές	Ημερήσιες μεταβολές	ΔΤ, ΔNO, ΔNO ₂ , ΔO ₃ , ΔPM ₁₀ , ΔSO ₂	Ανάλυση μεταβολών μεταξύ διαδοχικών ημερών
Μεταβλητές ομαδοποίησης	Χωρική και εποχική ταξινόμηση	Σταθμός, εποχή	Ανάλυση ανά σταθμό, ρύπο και εποχή

Πίνακας 3.2 Πηγές δεδομένων, μεταβλητές και τρόπος αξιοποίησής τους στην παρούσα εργασία.

3.4 Αντιστοίχιση σταθμών ατμοσφαιρικής ρύπανσης και μετεωρολογικών σταθμών

3.4.1 Αναγκαιότητα και κριτήρια αντιστοίχισης

Η διερεύνηση της στατιστικής σχέσης μεταξύ θερμοκρασίας και ατμοσφαιρικής ρύπανσης προϋποθέτει τον συνδυασμό δεδομένων που προέρχονται από διαφορετικά δίκτυα παρακολούθησης. Στην παρούσα εργασία, οι συγκεντρώσεις των εξεταζόμενων ατμοσφαιρικών ρύπων προήλθαν από τους επιλεγμένους σταθμούς του ΕΔΠΑΡ, ενώ οι θερμοκρασιακές παρατηρήσεις προήλθαν από μετεωρολογικούς σταθμούς της ΕΜΥ.

Οι σταθμοί των δύο δικτύων δεν βρίσκονται στις ίδιες ακριβώς θέσεις και, επομένως, δεν υπάρχει πλήρης χωρική ταύτιση μεταξύ των μετρήσεων θερμοκρασίας και ατμοσφαιρικής ρύπανσης. Για τον λόγο αυτό, κάθε σταθμός του ΕΔΠΑΡ αντιστοιχίστηκε με τον

καταλληλότερο διαθέσιμο μετεωρολογικό σταθμό της ΕΜΥ, ώστε οι θερμοκρασιακές παρατηρήσεις να προσεγγίζουν, στον βαθμό που ήταν εφικτό, τις ημερήσιες θερμοκρασιακές συνθήκες της περιοχής του αντίστοιχου σταθμού ατμοσφαιρικής ρύπανσης.

Η αντιστοίχιση δεν βασίστηκε αποκλειστικά στη μικρότερη γεωγραφική απόσταση. Η γεωγραφική εγγύτητα αποτέλεσε βασικό κριτήριο, καθώς όσο μικρότερη είναι η απόσταση μεταξύ δύο σταθμών τόσο περιορίζεται, κατά κανόνα, η πιθανότητα σημαντικών χωρικών διαφορών στη θερμοκρασία. Ωστόσο, η απόσταση από μόνη της δεν θεωρήθηκε επαρκής, επειδή ακόμη και σχετικά κοντινές θέσεις μπορεί να παρουσιάζουν διαφορετικές μικροκλιματικές συνθήκες.

Για τον λόγο αυτό, ελήφθησαν επίσης υπόψη η θέση των σταθμών στο λεκανοπέδιο της Αθήνας και στην ευρύτερη Αττική, το υψόμετρο, η τοπογραφία, η απόσταση από τη θάλασσα, ο βαθμός αστικοποίησης και ο χωρικός ή λειτουργικός χαρακτήρας της περιοχής. Οι παράγοντες αυτοί μπορούν να επηρεάζουν τις ημερήσιες θερμοκρασιακές συνθήκες, ιδίως σε περιοχές με διαφορετική πυκνότητα δόμησης, διαφορετική έκθεση σε θαλάσσια επίδραση ή διαφορετικά τοπικά χαρακτηριστικά αερισμού.

Επιπλέον, η τελική επιλογή επηρεάστηκε από τη χρονική κάλυψη, την πληρότητα και τη συνέχεια των διαθέσιμων θερμοκρασιακών χρονοσειρών. Η χρήση ενός μετεωρολογικού σταθμού με επαρκή και συνεχόμενα δεδομένα κρίθηκε απαραίτητη, ώστε να περιοριστεί η απώλεια κοινών παρατηρήσεων κατά τη συγχώνευση των δεδομένων θερμοκρασίας και ατμοσφαιρικής ρύπανσης για την περίοδο 2016–2024.

Η τελική αντιστοίχιση προέκυψε, επομένως, από τη συνδυαστική συνεκτίμηση χωρικών, περιβαλλοντικών και χρονικών κριτηρίων και όχι από την εφαρμογή ενός αποκλειστικού αριθμητικού κανόνα. Η διαδικασία αυτή δεν εξαλείφει τη χωρική αβεβαιότητα που προκύπτει από τη μη συνεγκατάσταση των σταθμών, αλλά παρέχει ένα συνεπές και διαφανές πλαίσιο για τον συνδυασμό των θερμοκρασιακών και ρυπαντικών χρονοσειρών.

3.4.2 Τελική αντιστοίχιση σταθμών και περιορισμοί

Με βάση τη συνδυαστική συνεκτίμηση της γεωγραφικής θέσης, των περιβαλλοντικών και τοπογραφικών χαρακτηριστικών, της χρονικής κάλυψης και της πληρότητας των

διαθέσιμων θερμοκρασιακών χρονοσειρών, διαμορφώθηκε η αντιστοίχιση των σταθμών του ΕΔΠΑΡ με τους σταθμούς της ΕΜΥ που παρουσιάζεται στον Πίνακα 3.3.

Σταθμός ΕΔΠΑΡ	Χαρακτήρας ΕΔΠΑΡ	Σταθμός ΕΜΥ	Λογική αντιστοίχισης
Ελευσίνα	Βιομηχανικός	Ελευσίνα	Κοινή γεωγραφική περιοχή και παρόμοιες τοπικές συνθήκες.
Θρακομακεδόνες	Περιαστικός	Τατόι	Βόρειος περιαστικός χαρακτήρας και σχετική μικροκλιματική ομοιότητα.
Λυκόβρυση	Προαστιακός	Τατόι	Γειτνίαση στον βόρειο τομέα του λεκανοπεδίου και διαθέσιμη θερμοκρασιακή χρονοσειρά.
Αριστοτέλους	Αστικού υποβάθρου	Ελληνικό	Διαθέσιμη και συνεχής θερμοκρασιακή χρονοσειρά για την προσέγγιση των ημερήσιων θερμοκρασιακών συνθηκών.
Πατησίων	Κυκλοφορίας	Ελληνικό	Διαθέσιμη και συνεχής θερμοκρασιακή χρονοσειρά για την προσέγγιση των ημερήσιων θερμοκρασιακών συνθηκών.

Πίνακας 3.3 Αντιστοίχιση των σταθμών ατμοσφαιρικής ρύπανσης του ΕΔΠΑΡ με τους μετεωρολογικούς σταθμούς της ΕΜΥ και βασική αιτιολόγηση των επιλογών.

Η αντιστοίχιση Ελευσίνας–Ελευσίνας παρουσιάζει τη μεγαλύτερη χωρική συμβατότητα, καθώς οι δύο σταθμοί βρίσκονται στην ίδια ευρύτερη γεωγραφική περιοχή. Η συγκεκριμένη αντιστοίχιση θεωρήθηκε η καταλληλότερη για την αποτύπωση των ημερήσιων θερμοκρασιακών συνθηκών της δυτικής Αττικής, όπου η παρουσία βιομηχανικών, ενεργειακών και λιμενικών δραστηριοτήτων διαφοροποιεί τον χαρακτήρα της περιοχής από τον κεντρικό αστικό ιστό.

Η χρήση του μετεωρολογικού σταθμού Τατοΐου για τη Λυκόβρυση και τους Θρακομακεδόνες βασίστηκε στην κοινή χωρική ένταξη των περιοχών στον βόρειο τομέα της Αττικής και στον προαστιακό ή περιαστικό χαρακτήρα τους. Η αντιστοίχιση αυτή κρίθηκε κατάλληλη για την προσέγγιση της ημερήσιας θερμοκρασιακής μεταβλητότητας των βόρειων και περιαστικών περιοχών, όπου η τοπογραφία, η βλάστηση και η μικρότερη άμεση αστική επιβάρυνση μπορεί να διαμορφώνουν διαφορετικές θερμοκρασιακές συνθήκες σε σχέση με το κέντρο της Αθήνας.

Για τους σταθμούς Αριστοτέλους και Πατησίων χρησιμοποιήθηκαν τα θερμοκρασιακά δεδομένα του Ελληνικού, κυρίως λόγω της επαρκούς χρονικής κάλυψης, της συνέχειας και της πληρότητας της διαθέσιμης χρονοσειράς κατά την περίοδο 2016–2024. Η συγκεκριμένη επιλογή παρουσιάζει μεγαλύτερη χωρική και μικροκλιματική αβεβαιότητα σε σύγκριση με τις υπόλοιπες αντιστοιχίσεις, καθώς το Ελληνικό βρίσκεται στον νότιο και παράκτιο τομέα της Αττικής, ενώ η Αριστοτέλους και η Πατησίων βρίσκονται στον πυκνοδομημένο κεντρικό αστικό ιστό.

Η χρήση του Ελληνικού για τους δύο κεντρικούς σταθμούς δεν σημαίνει ότι οι θερμοκρασιακές συνθήκες των περιοχών αυτών θεωρούνται ταυτόσημες. Οι θερμοκρασίες του Ελληνικού μπορεί να επηρεάζονται περισσότερο από τη γειτνίαση με τη θάλασσα και από διαφορετικές συνθήκες αερισμού, ενώ οι κεντρικοί σταθμοί επηρεάζονται περισσότερο από την πυκνή δόμηση, την κυκλοφοριακή δραστηριότητα και την αστική θερμική νησίδα. Ωστόσο, η διαθέσιμη και συνεχής χρονοσειρά του Ελληνικού επέτρεψε τη συνεπή χρονική αντιστοίχιση των δεδομένων για ολόκληρη την περίοδο της μελέτης.

Η αντιστοίχιση των σταθμών δεν συνεπάγεται πλήρη ταύτιση των τοπικών θερμοκρασιακών συνθηκών. Το υψόμετρο, η τοπογραφία, η πυκνότητα της δόμησης, η παρουσία βλάστησης, η απόσταση από τη θάλασσα και η έκθεση στους ανέμους μπορεί να διαφοροποιούν τη θερμοκρασία ακόμη και μεταξύ σχετικά κοντινών θέσεων. Για τον λόγο αυτό, οι θερμοκρασιακές παρατηρήσεις της EMY χρησιμοποιούνται ως προσεγγιστική

αναπαράσταση των συνθηκών που επικρατούν στην περιοχή κάθε σταθμού ατμοσφαιρικής ρύπανσης.

Ο περιορισμός αυτός λαμβάνεται υπόψη κατά την ερμηνεία των αποτελεσμάτων και ιδιαίτερα κατά τις συγκρίσεις μεταξύ σταθμών. Η συνεπής εφαρμογή της ίδιας αντιστοίχισης σε ολόκληρη την περίοδο μελέτης διασφαλίζει τη συγκρισιμότητα της μεθοδολογικής διαδικασίας μεταξύ ετών, εποχών και ρύπων, χωρίς να εξαλείφει τη χωρική αβεβαιότητα που απορρέει από τη μη συνεγκατάσταση των σταθμών.

3.5 Προεπεξεργασία και οργάνωση των δεδομένων

3.5.1 Καθαρισμός και ομογενοποίηση δεδομένων

Πριν από την εφαρμογή των στατιστικών αναλύσεων, τα δεδομένα ατμοσφαιρικής ρύπανσης και θερμοκρασίας υποβλήθηκαν σε διαδικασία ελέγχου, καθαρισμού και ομογενοποίησης. Η διαδικασία αυτή ήταν απαραίτητη, καθώς τα δεδομένα προέρχονταν από διαφορετικούς φορείς, διαφορετικούς σταθμούς μέτρησης και διαφορετικές χρονοσειρές. Επομένως, πριν από τη συγχώνευσή τους έπρεπε να διασφαλιστεί ότι οι παρατηρήσεις ήταν χρονικά συμβατές και κατάλληλες για κοινή στατιστική επεξεργασία. Ο αρχικός έλεγχος αφορούσε την πληρότητα των χρονοσειρών, την παρουσία ελλειπουσών, μη έγκυρων ή μη αριθμητικών τιμών, καθώς και τη συμβατότητα της χρονικής μορφής των αρχείων μεταξύ διαφορετικών ετών, σταθμών και ρύπων. Εξετάστηκε επίσης αν οι ημερομηνίες ήταν καταγεγραμμένες με ενιαίο τρόπο και αν οι διαθέσιμες τιμές μπορούσαν να ταξινομηθούν και να αντιστοιχιστούν σωστά σε ημερήσια βάση. Οι μη έγκυρες ή ελλείπουσες παρατηρήσεις δεν αντικαταστάθηκαν με εκτιμώμενες τιμές. Η επιλογή αυτή έγινε ώστε να μην εισαχθεί πρόσθετη αβεβαιότητα στις χρονοσειρές μέσω διαδικασιών παρεμβολής ή συμπλήρωσης κενών. Αντίθετα, κάθε επιμέρους ανάλυση πραγματοποιήθηκε μόνο με τις διαθέσιμες έγκυρες και χρονικά αντιστοιχισμένες παρατηρήσεις για τον αντίστοιχο συνδυασμό σταθμού, ρύπου και εποχής. Μετά τον καθαρισμό, οι χρονοσειρές οργάνωθηκαν σε ενιαία μορφή, ώστε να είναι δυνατή η επεξεργασία τους με κοινή μεθοδολογική διαδικασία. Για κάθε παρατήρηση διατηρήθηκαν

οι βασικές πληροφορίες που ήταν απαραίτητες για την ανάλυση, δηλαδή η ημερομηνία, ο σταθμός ατμοσφαιρικής ρύπανσης, ο εξεταζόμενος ρύπος, η αντίστοιχη συγκέντρωση, ο αντιστοιχισμένος μετεωρολογικός σταθμός και η θερμοκρασιακή τιμή. Η ομογενοποίηση των δεδομένων επέτρεψε τη δημιουργία κοινής ημερήσιας χρονικής βάσης. Με τον τρόπο αυτό, οι ημερήσιες θερμοκρασιακές τιμές της EMY μπορούσαν να αντιστοιχιστούν με τις αντίστοιχες ημερήσιες συγκεντρώσεις των ρύπων από το ΕΔΠΑΡ. Η διαδικασία αυτή αποτέλεσε το βασικό στάδιο προετοιμασίας πριν από τον υπολογισμό των ημερήσιων μέσων τιμών, των μεταβολών μεταξύ διαδοχικών ημερών και της εποχικής ταξινόμησης των παρατηρήσεων.

3.5.2 Υπολογισμός ημερήσιων μέσων τιμών

Ως βασική χρονική μονάδα ανάλυσης ορίστηκε η ημερήσια παρατήρηση. Κάθε παρατήρηση αντιστοιχούσε σε συγκεκριμένο συνδυασμό ημερομηνίας, σταθμού ατμοσφαιρικής ρύπανσης και εξεταζόμενου ρύπου. Για κάθε ημερολογιακή ημέρα αντιστοιχίστηκε η ημερήσια μέση θερμοκρασία του αέρα από τον κατάλληλο μετεωρολογικό σταθμό της EMY με την αντίστοιχη ημερήσια μέση συγκέντρωση του διαθέσιμου ατμοσφαιρικού ρύπου από τον σταθμό του ΕΔΠΑΡ.

Η ημερήσια κλίμακα επιλέχθηκε επειδή ανταποκρίνεται στον σκοπό της έρευνας, ο οποίος αφορά τη διερεύνηση τόσο της σχέσης μεταξύ των ημερήσιων επιπέδων θερμοκρασίας και συγκεντρώσεων όσο και των μεταβολών τους μεταξύ διαδοχικών ημερών. Με τον τρόπο αυτό δημιουργήθηκε κοινή χρονική βάση για τη σύγκριση των δύο κατηγοριών δεδομένων και για την εφαρμογή των ίδιων στατιστικών μεθόδων σε όλους τους συνδυασμούς σταθμού και ρύπου.

Η χρήση ημερήσιων μέσων τιμών περιορίζει την επίδραση των έντονων ενδοημερήσιων διακυμάνσεων που χαρακτηρίζουν τις ωριαίες μετρήσεις. Οι συγκεντρώσεις των ατμοσφαιρικών ρύπων και η θερμοκρασία μπορεί να μεταβάλλονται σημαντικά μέσα στην ίδια ημέρα, λόγω του ημερήσιου κύκλου της οδικής κυκλοφορίας, της ηλιακής ακτινοβολίας, της φωτοχημικής δραστηριότητας και των μεταβολών στις συνθήκες ατμοσφαιρικής ανάμιξης. Η μετατροπή σε ημερήσια βάση εξομαλύνει μέρος αυτής της ενδοημερήσιας μεταβλητότητας.

Παράλληλα, η ημερήσια κλίμακα διατηρεί μεγαλύτερο βαθμό χρονικής λεπτομέρειας σε σχέση με τη χρήση μηνιαίων ή ετήσιων μέσων τιμών. Η συγκέντρωση των δεδομένων σε μεγαλύτερες χρονικές κλίμακες θα μπορούσε να αποκρύψει βραχυχρόνιες μεταβολές, εποχικές διαφοροποιήσεις ή επεισοδιακές αυξήσεις των συγκεντρώσεων. Για τον λόγο αυτό, η ημερήσια παρατήρηση θεωρήθηκε κατάλληλη για τη συγκριτική, εποχική και χωρική στατιστική διερεύνηση.

Η επιλογή της ημερήσιας κλίμακας συνεπάγεται, ωστόσο, ότι δεν εξετάζονται άμεσα οι ενδοημερήσιες σχέσεις μεταξύ θερμοκρασίας και συγκεντρώσεων. Χαρακτηριστικά φαινόμενα, όπως οι πρωινές κορυφώσεις των κυκλοφοριακών ρύπων ή οι μεσημβρινές και απογευματινές αυξήσεις του O_3 , μπορεί να εξομαλύνονται στις ημερήσιες μέσες τιμές. Ο περιορισμός αυτός λαμβάνεται υπόψη κατά την ερμηνεία των αποτελεσμάτων.

3.5.3 Υπολογισμός μεταβολών μεταξύ διαδοχικών ημερών

Πέρα από την εξέταση των ημερήσιων μέσων τιμών, η παρούσα εργασία διερευνά και τις μεταβολές της θερμοκρασίας και των συγκεντρώσεων των ατμοσφαιρικών ρύπων μεταξύ διαδοχικών ημερών. Η προσέγγιση αυτή εφαρμόστηκε προκειμένου να εξεταστεί κατά πόσο η αύξηση ή η μείωση της θερμοκρασίας από τη μία ημέρα στην επόμενη συνδέεται με αντίστοιχη μεταβολή στη συγκέντρωση κάθε εξεταζόμενου ρύπου. Με τον τρόπο αυτό, η ανάλυση δεν περιορίζεται στη σύγκριση των απόλυτων ημερήσιων επιπέδων, αλλά επεκτείνεται και στη βραχυχρόνια εξέλιξη των δύο μεγεθών.

Για κάθε ημέρα t , η ημερήσια μεταβολή της θερμοκρασίας υπολογίστηκε ως:

$$\Delta T_t = T_t - T_{t-1}$$

όπου:

- ΔT_t είναι η ημερήσια μεταβολή της θερμοκρασίας,
- T_t η ημερήσια μέση θερμοκρασία της ημέρας t
- T_{t-1} η ημερήσια μέση θερμοκρασία της αμέσως προηγούμενης ημερολογιακής ημέρας.

Αντίστοιχα, για κάθε εξεταζόμενο ρύπο, η ημερήσια μεταβολή της συγκέντρωσης υπολογίστηκε ως:

$$\Delta P_t = P_t - P_{t-1}$$

όπου:

- ΔP_t είναι η ημερήσια μεταβολή της συγκέντρωσης του ρύπου,
- P_t η ημερήσια μέση συγκέντρωση της ημέρας t ,
- P_{t-1} η ημερήσια μέση συγκέντρωση του ίδιου ρύπου την αμέσως προηγούμενη ημερολογιακή ημέρα.

Θετικές τιμές των ΔT_t και ΔP_t δηλώνουν αύξηση της θερμοκρασίας ή της συγκέντρωσης αντίστοιχα, ενώ αρνητικές τιμές δηλώνουν μείωση. Τιμές κοντά στο μηδέν υποδηλώνουν περιορισμένη μεταβολή μεταξύ των δύο διαδοχικών ημερών.

Οι πρώτες διαφορές υπολογίστηκαν μόνο όταν υπήρχαν έγκυρες παρατηρήσεις και για τις δύο πραγματικά διαδοχικές ημερολογιακές ημέρες. Όταν μεσολαβούσε μία ή περισσότερες ημέρες χωρίς διαθέσιμη ή έγκυρη παρατήρηση, δεν υπολογιζόταν διαφορά μεταξύ της τελευταίας διαθέσιμης τιμής πριν από το κενό και της πρώτης διαθέσιμης τιμής μετά από αυτό. Η απαίτηση αυτή εφαρμόστηκε τόσο στη θερμοκρασιακή χρονοσειρά όσο και στη χρονοσειρά του εκάστοτε ρύπου, ώστε κάθε τιμή μεταβολής να αντιστοιχεί αποκλειστικά σε δύο συνεχόμενες ημερολογιακές ημέρες και να διατηρεί σαφή ημερήσια ερμηνεία.

Η ανάλυση των πρώτων διαφορών χρησιμοποιήθηκε συμπληρωματικά προς την ανάλυση των ημερήσιων μέσων τιμών, καθώς επικεντρώνεται περισσότερο στις βραχυχρόνιες συν-μεταβολές από τη μία ημέρα στην επόμενη. Η προσέγγιση αυτή περιορίζει την επίδραση των αργών χρονικών και εποχικών μεταβολών, χωρίς όμως να τις εξαλείφει πλήρως. Παράλληλα, δεν απομονώνει την επίδραση της χρονικής αυτοσυσχέτισης, του ανέμου, της βροχόπτωσης, της υγρασίας, της ηλιακής ακτινοβολίας ή των ημερήσιων μεταβολών στις εκπομπές. Η χρήση των πρώτων διαφορών είναι ιδιαίτερα χρήσιμη στην παρούσα εργασία, καθώς επιτρέπει τη σύγκριση της βραχυχρόνιας συμπεριφοράς διαφορετικών ρύπων και σταθμών με κοινό τρόπο υπολογισμού.

Για τον λόγο αυτό, τα αποτελέσματα των πρώτων διαφορών ερμηνεύονται ως συμπληρωματική ένδειξη της βραχυχρόνιας συνδιακύμανσης μεταξύ θερμοκρασίας και συγκεντρώσεων των ρύπων και όχι ως τεκμηρίωση άμεσης αιτιώδους επίδρασης.

3.5.4 Εποχική ταξινόμηση των παρατηρήσεων

Τα δεδομένα ταξινομήθηκαν σε τέσσερις εποχικές κατηγορίες, προκειμένου να διερευνηθεί εάν η σχέση μεταξύ θερμοκρασίας και συγκεντρώσεων των ατμοσφαιρικών ρύπων διαφοροποιείται κατά τη διάρκεια του έτους. Η εποχική ανάλυση κρίθηκε απαραίτητη, καθώς οι πηγές εκπομπής, οι μετεωρολογικές συνθήκες, η φωτοχημική δραστηριότητα και οι συνθήκες ατμοσφαιρικής διασποράς μεταβάλλονται σημαντικά μεταξύ των εποχών.

Η ταξινόμηση πραγματοποιήθηκε σύμφωνα με τη συμβατική μετεωρολογική διάκριση των εποχών, όπως παρουσιάζεται στον Πίνακα 3.4.

Εποχή	Μήνες
Χειμώνας	Δεκέμβριος – Ιανουάριος – Φεβρουάριος
Άνοιξη	Μάρτιος – Απρίλιος – Μάιος
Καλοκαίρι	Ιούνιος – Ιούλιος – Αύγουστος
Φθινόπωρο	Σεπτέμβριος – Οκτώβριος – Νοέμβριος

Πίνακας 3.4 Μετεωρολογική ταξινόμηση των εποχών που εφαρμόστηκε στην ανάλυση.

Για την ανάλυση των ημερήσιων μέσων τιμών, κάθε παρατήρηση εντάχθηκε στην αντίστοιχη εποχή με βάση τον ημερολογιακό μήνα στον οποίο ανήκε. Ο Δεκέμβριος κάθε έτους ταξινομήθηκε ως χειμερινός μήνας του ίδιου ημερολογιακού έτους, χωρίς να δημιουργηθεί ξεχωριστή κατηγορία «χειμερινού έτους» που να τον συνδέει με τον Ιανουάριο και τον Φεβρουάριο του επόμενου έτους. Η επιλογή αυτή διατηρεί απλή και ενιαία τη χρονική οργάνωση των δεδομένων σε όλη την περίοδο μελέτης.

Στην ανάλυση των μεταβολών μεταξύ διαδοχικών ημερών, η εποχική κατηγορία αποδόθηκε με βάση την ημερομηνία της ημέρας *ttt*, δηλαδή της ημέρας για την οποία υπολογίστηκαν

οι τιμές ΔT_t και ΔP_t . Κατά συνέπεια, όταν δύο διαδοχικές ημέρες ανήκαν σε διαφορετικούς μήνες ή εποχές, η μεταβολή ταξινομήθηκε στην εποχή της δεύτερης ημέρας. Η επιλογή αυτή εξασφαλίζει ενιαίο κανόνα ταξινόμησης για όλες τις μεταβολές και συνεπή σύγκριση των αποτελεσμάτων μεταξύ εποχών, χωρίς να δημιουργούνται διαφορετικές περιπτώσεις χειρισμού στα όρια των μηνών.

Η εποχική ταξινόμηση εφαρμόστηκε τόσο στις ημερήσιες μέσες τιμές όσο και στις μεταβολές μεταξύ διαδοχικών ημερών. Με τον τρόπο αυτό εξετάστηκαν, αφενός, οι σχέσεις μεταξύ των απόλυτων ημερήσιων επιπέδων θερμοκρασίας και ρύπων σε κάθε εποχή και, αφετέρου, οι βραχυχρόνιες συν-μεταβολές τους στο αντίστοιχο εποχικό πλαίσιο. Η κοινή εφαρμογή της ίδιας ταξινόμησης και στις δύο αναλυτικές προσεγγίσεις διευκολύνει την άμεση σύγκριση των αποτελεσμάτων.

Η χωριστή εξέταση των τεσσάρων εποχών επιτρέπει την ανάδειξη σχέσεων που μπορεί να εξασθενούν, να ενισχύονται ή να μεταβάλλουν κατεύθυνση όταν οι παρατηρήσεις όλων των εποχών συνδυάζονται σε ένα ενιαίο σύνολο. Επιτρέπει επίσης να εντοπιστούν εποχικές διαφοροποιήσεις που σχετίζονται με την ένταση των εκπομπών, τη φωτοχημική δραστηριότητα και τις συνθήκες διασποράς. Η εποχική ταξινόμηση χρησιμοποιήθηκε, επομένως, ως τρόπος ομαδοποίησης των δεδομένων και σύγκρισης των αποτελεσμάτων ανά εποχή.

3.5.5 Δημιουργία τελικών αναλυτικών συνόλων δεδομένων

Μετά την ολοκλήρωση του καθαρισμού, της ομογενοποίησης, της ημερήσιας οργάνωσης, του υπολογισμού των μεταβολών μεταξύ διαδοχικών ημερών και της εποχικής ταξινόμησης, δημιουργήθηκαν τα τελικά αναλυτικά σύνολα δεδομένων. Τα σύνολα αυτά αποτέλεσαν τη βάση για την περιγραφική στατιστική, την ανάλυση συσχέτισης και την απλή γραμμική παλινδρόμηση που εφαρμόστηκαν στα επόμενα στάδια της μεθοδολογίας. Τα τελικά σύνολα δεδομένων διαμορφώθηκαν χωριστά για κάθε συνδυασμό σταθμού ατμοσφαιρικής ρύπανσης, εξεταζόμενου ρύπου και εποχής. Η επιλογή αυτή κρίθηκε απαραίτητη, επειδή η διαθεσιμότητα των ρύπων, ο αριθμός των έγκυρων παρατηρήσεων και τα χαρακτηριστικά των χρονοσειρών δεν ήταν ίδια σε όλους τους σταθμούς και σε όλες τις εποχές.

Για κάθε συνδυασμό δημιουργήθηκαν δύο τύποι αναλυτικών δεδομένων. Ο πρώτος περιλάμβανε τις ημερήσιες μέσες τιμές θερμοκρασίας και συγκέντρωσης του αντίστοιχου ρύπου. Ο δεύτερος περιλάμβανε τις ημερήσιες μεταβολές της θερμοκρασίας και της συγκέντρωσης του ρύπου μεταξύ πραγματικά διαδοχικών ημερολογιακών ημερών. Με τον τρόπο αυτό διατηρήθηκε η διάκριση μεταξύ της ανάλυσης των απόλυτων ημερήσιων επιπέδων και της ανάλυσης των βραχυχρόνιων μεταβολών.

Η πρώτη κατηγορία δεδομένων χρησιμοποιήθηκε για τη διερεύνηση των σχέσεων μεταξύ ημερήσιας μέσης θερμοκρασίας και ημερήσιων συγκεντρώσεων των ρύπων. Οι σχέσεις αυτές μπορεί να αντανακλούν σε σημαντικό βαθμό την ευρύτερη εποχική συνδιακύμανση των μεταβλητών, καθώς οι θερμοκρασιακές συνθήκες και οι συγκεντρώσεις των ρύπων μεταβάλλονται συστηματικά κατά τη διάρκεια του έτους.

Η δεύτερη κατηγορία δεδομένων χρησιμοποιήθηκε για τη διερεύνηση της σχέσης μεταξύ των ημερήσιων μεταβολών της θερμοκρασίας και των αντίστοιχων μεταβολών των ρύπων. Η ανάλυση αυτή επιτρέπει την εστίαση στις βραχυχρόνιες συν-μεταβολές από τη μία ημέρα στην επόμενη και λειτουργεί συμπληρωματικά προς την ανάλυση των ημερήσιων μέσων τιμών.

Η δημιουργία χωριστών συνόλων δεδομένων ανά σταθμό, ρύπο και εποχή διασφάλισε τη συνέπεια της ανάλυσης και επέτρεψε τη συγκριτική αξιολόγηση των αποτελεσμάτων. Με τον τρόπο αυτό ήταν δυνατή η εξέταση του κατά πόσο η σχέση θερμοκρασίας και ρύπων διαφοροποιείται ανάλογα με τον χαρακτήρα του σταθμού, την εποχή και τη χρονική μορφή των δεδομένων.

Το τελικό πλήθος παρατηρήσεων δεν ήταν ίδιο για όλους τους συνδυασμούς σταθμού, ρύπου και εποχής, καθώς εξαρτήθηκε από τη διαθεσιμότητα και την πληρότητα των αρχικών χρονοσειρών. Για τον λόγο αυτό, οι στατιστικές αναλύσεις βασίστηκαν κάθε φορά στο διαθέσιμο σύνολο έγκυρων και χρονικά αντιστοιχισμένων παρατηρήσεων. Η διαφοροποίηση αυτή λαμβάνεται υπόψη κατά την παρουσίαση και την ερμηνεία των αποτελεσμάτων, ιδιαίτερα σε περιπτώσεις όπου ο αριθμός παρατηρήσεων είναι μικρότερος για συγκεκριμένους σταθμούς, ρύπους ή εποχές.

3.6 Στατιστικές μέθοδοι ανάλυσης

Η στατιστική ανάλυση πραγματοποιήθηκε με σκοπό τη διερεύνηση της σχέσης μεταξύ θερμοκρασίας και συγκεντρώσεων των εξεταζόμενων ατμοσφαιρικών ρύπων. Οι μέθοδοι εφαρμόστηκαν χωριστά ανά σταθμό, ρύπο και εποχή, τόσο στις ημερήσιες μέσες τιμές όσο και στις μεταβολές μεταξύ διαδοχικών ημερών.

Η ανάλυση περιλάμβανε τρία βασικά στάδια: περιγραφική στατιστική, ανάλυση συσχέτισης και απλή γραμμική παλινδρόμηση. Η περιγραφική στατιστική χρησιμοποιήθηκε για την αρχική αποτύπωση των δεδομένων, η ανάλυση συσχέτισης για την εκτίμηση της κατεύθυνσης και της έντασης της σχέσης μεταξύ των μεταβλητών και η απλή γραμμική παλινδρόμηση για την ποσοτική περιγραφή της σχέσης θερμοκρασίας και συγκέντρωσης κάθε ρύπου.

3.6.1 Περιγραφική στατιστική

Η περιγραφική στατιστική αποτέλεσε το πρώτο στάδιο της στατιστικής επεξεργασίας των δεδομένων. Σκοπός της ήταν η συνοπτική αποτύπωση των βασικών χαρακτηριστικών των χρονοσειρών θερμοκρασίας και ατμοσφαιρικής ρύπανσης πριν από την εφαρμογή των αναλύσεων συσχέτισης και παλινδρόμησης.

Για κάθε συνδυασμό σταθμού, ρύπου και εποχής υπολογίστηκαν βασικά περιγραφικά μέτρα, όπως ο αριθμός των έγκυρων παρατηρήσεων, η μέση τιμή, η ελάχιστη και μέγιστη τιμή και η τυπική απόκλιση. Τα μέτρα αυτά χρησιμοποιήθηκαν για την αξιολόγηση της πληρότητας των δεδομένων, του εύρους μεταβολής των τιμών, της διασποράς των παρατηρήσεων και της διαφοροποίησης των συγκεντρώσεων μεταξύ σταθμών και εποχών. Η περιγραφική στατιστική εφαρμόστηκε τόσο στις ημερήσιες μέσες τιμές όσο και στις μεταβολές μεταξύ διαδοχικών ημερών. Με τον τρόπο αυτό ήταν δυνατή η αρχική σύγκριση των απόλυτων ημερήσιων επιπέδων θερμοκρασίας και ρύπων, αλλά και της βραχυχρόνιας μεταβλητότητάς τους. Η παράλληλη εξέταση των δύο αυτών μορφών δεδομένων επέτρεψε την καλύτερη κατανόηση τόσο των γενικών επιπέδων των μεταβλητών όσο και της έντασης των ημερήσιων μεταβολών τους.

Τα αποτελέσματα της περιγραφικής στατιστικής χρησιμοποιήθηκαν υποστηρικτικά για την ερμηνεία των επόμενων αναλύσεων. Ειδικότερα, βοήθησαν στον εντοπισμό διαφορών στην

πληρότητα των δεδομένων, στη μεταβλητότητα των χρονοσειρών και στην εποχική ή χωρική διαφοροποίηση των συγκεντρώσεων. Η περιγραφική στατιστική δεν χρησιμοποιήθηκε για την τεκμηρίωση στατιστικής σχέσης μεταξύ θερμοκρασίας και ατμοσφαιρικών ρύπων, αλλά ως αρχικό στάδιο κατανόησης και ελέγχου των δεδομένων.

3.6.2 Ανάλυση συσχέτισης

Η ανάλυση συσχέτισης χρησιμοποιήθηκε για την εκτίμηση της κατεύθυνσης και της έντασης της στατιστικής σχέσης μεταξύ θερμοκρασίας και συγκεντρώσεων των εξεταζόμενων ατμοσφαιρικών ρύπων. Σκοπός της ήταν να διερευνηθεί εάν υψηλότερες ή χαμηλότερες τιμές θερμοκρασίας συνδέονται με αντίστοιχα υψηλότερες ή χαμηλότερες συγκεντρώσεις ρύπων, καθώς και εάν οι ημερήσιες μεταβολές της θερμοκρασίας συνδέονται με αντίστοιχες μεταβολές στις συγκεντρώσεις. Για τον σκοπό αυτό υπολογίστηκε ο συντελεστής γραμμικής συσχέτισης Pearson. Ο συντελεστής αυτός λαμβάνει τιμές από -1 έως +1. Θετικές τιμές δηλώνουν ότι οι δύο μεταβλητές τείνουν να αυξάνονται ή να μειώνονται προς την ίδια κατεύθυνση, ενώ αρνητικές τιμές δηλώνουν αντίθετη μεταβολή. Τιμές κοντά στο μηδέν υποδηλώνουν ασθενή ή μη γραμμική σχέση μεταξύ των εξεταζόμενων μεταβλητών.

Η ανάλυση εφαρμόστηκε χωριστά για κάθε συνδυασμό σταθμού, ρύπου και εποχής. Με τον τρόπο αυτό ήταν δυνατή η διερεύνηση της χωρικής και εποχικής διαφοροποίησης της σχέσης μεταξύ θερμοκρασίας και ατμοσφαιρικής ρύπανσης, χωρίς να συγχωνεύονται παρατηρήσεις που αντιστοιχούν σε διαφορετικά περιβαλλοντικά και μετεωρολογικά πλαίσια. Ο συντελεστής συσχέτισης υπολογίστηκε σε δύο επίπεδα. Στο πρώτο επίπεδο εξετάστηκε η σχέση μεταξύ ημερήσιας μέσης θερμοκρασίας και ημερήσιας μέσης συγκέντρωσης κάθε ρύπου. Στο δεύτερο επίπεδο εξετάστηκε η σχέση μεταξύ της ημερήσιας μεταβολής της θερμοκρασίας και της αντίστοιχης ημερήσιας μεταβολής της συγκέντρωσης του ρύπου. Η διπλή αυτή προσέγγιση επέτρεψε τη σύγκριση των σχέσεων που εμφανίζονται στις απόλυτες ημερήσιες τιμές με εκείνες που εμφανίζονται στις βραχυχρόνιες μεταβολές. Η στατιστική σημαντικότητα των συσχετίσεων αξιολογήθηκε με βάση την τιμή p . Ωστόσο, η ερμηνεία των αποτελεσμάτων δεν βασίστηκε αποκλειστικά στη στατιστική σημαντικότητα, αλλά και στο μέγεθος, στην κατεύθυνση και στη συνέπεια των

συσχετίσεων μεταξύ σταθμών, εποχών και ρύπων. Η προσέγγιση αυτή κρίθηκε απαραίτητη, καθώς σε μεγάλα σύνολα δεδομένων ακόμη και ασθενείς συσχετίσεις μπορεί να εμφανίζονται στατιστικά σημαντικές. Η ανάλυση συσχέτισης χρησιμοποιήθηκε ως μέσο περιγραφής της στατιστικής συνδιακύμανσης των μεταβλητών και όχι ως απόδειξη αιτιώδους σχέσης. Οι τιμές του συντελεστή Pearson ερμηνεύτηκαν λαμβάνοντας υπόψη ότι οι συγκεντρώσεις των ρύπων επηρεάζονται και από άλλους παράγοντες, όπως οι εκπομπές, η ατμοσφαιρική διασπορά, η φωτοχημική δραστηριότητα, ο άνεμος, η υγρασία και η βροχόπτωση.

3.6.3 Απλή γραμμική παλινδρόμηση

Η απλή γραμμική παλινδρόμηση χρησιμοποιήθηκε για την ποσοτική περιγραφή της σχέσης μεταξύ θερμοκρασίας και συγκεντρώσεων των εξεταζόμενων ατμοσφαιρικών ρύπων. Η μέθοδος εφαρμόστηκε συμπληρωματικά προς την ανάλυση συσχέτισης, καθώς επιτρέπει την εκτίμηση του βαθμού μεταβολής της συγκέντρωσης ενός ρύπου σε σχέση με τη μεταβολή της θερμοκρασίας.

Στο πρώτο επίπεδο ανάλυσης, η ημερήσια μέση θερμοκρασία χρησιμοποιήθηκε ως ανεξάρτητη μεταβλητή και η ημερήσια μέση συγκέντρωση κάθε ρύπου ως εξαρτημένη μεταβλητή.

Η γενική μορφή του υποδείγματος ήταν:

$$P_t = \alpha + \beta T_t + \varepsilon_t$$

όπου:

- P_t είναι η ημερήσια μέση συγκέντρωση του ρύπου την ημέρα t ,
- T_t η ημερήσια μέση θερμοκρασία,
- α η σταθερά του υποδείγματος,
- β ο συντελεστής κλίσης,
- ε_t ο όρος σφάλματος.

Στο δεύτερο επίπεδο ανάλυσης, η ημερήσια μεταβολή της θερμοκρασίας χρησιμοποιήθηκε ως ανεξάρτητη μεταβλητή και η ημερήσια μεταβολή της συγκέντρωσης κάθε ρύπου ως εξαρτημένη μεταβλητή.

Η γενική μορφή του υποδείγματος ήταν:

$$\Delta P_t = \alpha + \beta \Delta T_t + \varepsilon_t$$

όπου:

- ΔP_t είναι η ημερήσια μεταβολή της συγκέντρωσης του ρύπου,
- ΔT_t η ημερήσια μεταβολή της θερμοκρασίας,
- α η σταθερά του υποδείγματος,
- β ο συντελεστής κλίσης,
- ε_t ο όρος σφάλματος.

Ο συντελεστής β χρησιμοποιήθηκε για την εκτίμηση της κατεύθυνσης και του μεγέθους της γραμμικής σχέσης. Θετική τιμή του β δηλώνει ότι η αύξηση της θερμοκρασίας συνδέεται με αύξηση της συγκέντρωσης του ρύπου, ενώ αρνητική τιμή δηλώνει ότι η αύξηση της θερμοκρασίας συνδέεται με μείωση της συγκέντρωσης. Η τιμή του R^2 χρησιμοποιήθηκε για την εκτίμηση του ποσοστού της μεταβλητότητας της εξαρτημένης μεταβλητής που εξηγείται από τη θερμοκρασία στο αντίστοιχο γραμμικό υπόδειγμα. Οι παλινδρομήσεις εφαρμόστηκαν χωριστά ανά σταθμό, ρύπο και εποχή, τόσο για τις ημερήσιες μέσες τιμές όσο και για τις ημερήσιες μεταβολές. Η χωριστή εφαρμογή των υποδειγμάτων επέτρεψε τη σύγκριση της σχέσης θερμοκρασίας και ρύπων μεταξύ διαφορετικών χωρικών και εποχικών πλαισίων.

Η στατιστική σημαντικότητα του συντελεστή β αξιολογήθηκε με βάση την τιμή p . Ωστόσο, όπως και στην ανάλυση συσχέτισης, η ερμηνεία δεν βασίστηκε αποκλειστικά στη στατιστική σημαντικότητα, αλλά και στο πρόσημο, στο μέγεθος του συντελεστή, στην τιμή του R^2 και στη συνέπεια των αποτελεσμάτων μεταξύ σταθμών, εποχών και ρύπων.

Η απλή γραμμική παλινδρόμηση χρησιμοποιήθηκε ως εργαλείο περιγραφής της γραμμικής σχέσης μεταξύ δύο μεταβλητών και όχι ως μέθοδος τεκμηρίωσης αιτιώδους επίδρασης. Η θερμοκρασία δεν αποτελεί τον μοναδικό παράγοντα που επηρεάζει τις συγκεντρώσεις των ρύπων, ενώ άλλες μετεωρολογικές και ανθρωπογενείς παράμετροι δεν συμπεριλήφθηκαν στα διμεταβλητά υποδείγματα.

3.6.4 Εποχική και χωρική σύγκριση αποτελεσμάτων

Μετά την εφαρμογή της ανάλυσης συσχέτισης και της απλής γραμμικής παλινδρόμησης, τα αποτελέσματα συγκρίθηκαν ως προς την εποχή, τον σταθμό και τον εξεταζόμενο ρύπο. Στόχος της συγκριτικής αυτής προσέγγισης ήταν να διερευνηθεί κατά πόσο η κατεύθυνση, η ένταση και η στατιστική σημαντικότητα των σχέσεων διαφοροποιούνται ανάλογα με το εποχικό και χωρικό πλαίσιο.

Η εποχική σύγκριση βασίστηκε στα αποτελέσματα που προέκυψαν χωριστά για τον χειμώνα, την άνοιξη, το καλοκαίρι και το φθινόπωρο. Με τον τρόπο αυτό εξετάστηκε εάν οι σχέσεις μεταξύ θερμοκρασίας και συγκεντρώσεων των ρύπων παραμένουν σταθερές ή παρουσιάζουν διαφοροποιήσεις μεταξύ των εποχών.

Η χωρική σύγκριση πραγματοποιήθηκε μεταξύ των επιλεγμένων σταθμών ατμοσφαιρικής ρύπανσης. Η σύγκριση σταθμών διαφορετικού χαρακτήρα επέτρεψε να αξιολογηθεί αν τα αποτελέσματα διαφοροποιούνται μεταξύ κυκλοφοριακά επιβαρυσμένων, αστικών, προαστιακών, περιαστικών και βιομηχανικά επηρεασμένων περιοχών. Οι χωρικές διαφοροποιήσεις ερμηνεύθηκαν με προσοχή, καθώς μπορεί να συνδέονται με τις τοπικές πηγές εκπομπής, τις συνθήκες διασποράς και μεταφοράς των ρύπων, καθώς και με τους περιορισμούς της αντιστοίχισης των σταθμών ΕΔΠΑΡ και ΕΜΥ.

Τα αποτελέσματα συγκρίθηκαν επίσης ανά ρύπο, δεδομένου ότι οι εξεταζόμενοι ρύποι διαφέρουν ως προς τις πηγές εκπομπής, τους μηχανισμούς σχηματισμού και τη χημική τους συμπεριφορά. Η σύγκριση αυτή επέτρεψε να εξεταστεί αν τα στατιστικά ευρήματα συμφωνούν με τις θεωρητικά αναμενόμενες σχέσεις που παρουσιάστηκαν στο Κεφάλαιο 2, χωρίς να αποδίδεται σε αυτά αιτιώδης ερμηνεία.

Η συγκριτική αξιολόγηση εφαρμόστηκε τόσο στα αποτελέσματα των ημερήσιων μέσων τιμών όσο και στα αποτελέσματα των μεταβολών μεταξύ διαδοχικών ημερών. Έτσι εξετάστηκε αν οι σχέσεις που εμφανίζονται στις απόλυτες ημερήσιες τιμές διατηρούνται, εξασθενούν ή μεταβάλλονται όταν η ανάλυση επικεντρώνεται στη βραχυχρόνια συνδιακύμανση των δύο μεγεθών.

Ιδιαίτερη έμφαση δόθηκε στη συνέπεια της κατεύθυνσης και του μεγέθους των σχέσεων μεταξύ επιμέρους εποχών και σταθμών. Ένα μεμονωμένο στατιστικά σημαντικό αποτέλεσμα δεν θεωρήθηκε από μόνο του επαρκές για τη διατύπωση γενικότερου συμπεράσματος, όταν δεν συνοδευόταν από παρόμοια εικόνα σε άλλες περιπτώσεις ή όταν η ερμηνευτική ικανότητα του μοντέλου παρέμενε πολύ χαμηλή.

Η τελική ερμηνεία βασίστηκε στη συνδυαστική αξιολόγηση του προσήμου και του μεγέθους των συντελεστών συσχέτισης και παλινδρόμησης, της τιμής R^2 , της τιμής p και της συνέπειας των ευρημάτων μεταξύ εποχών, σταθμών και ρύπων. Με τον τρόπο αυτό αποφεύχθηκε η αποσπασματική ερμηνεία μεμονωμένων στατιστικών τιμών και δόθηκε έμφαση στη συνολική εικόνα και στα επαναλαμβανόμενα πρότυπα των αποτελεσμάτων.

3.6.5 Ερμηνεία και όρια των στατιστικών αποτελεσμάτων

Η ερμηνεία των στατιστικών αποτελεσμάτων πραγματοποιήθηκε με προσοχή, λαμβάνοντας υπόψη ότι η ανάλυση εξετάζει τη σχέση της θερμοκρασίας με κάθε ρύπο χωριστά. Οι μέθοδοι που εφαρμόστηκαν αποτυπώνουν τη γραμμική συνδιακύμανση μεταξύ θερμοκρασίας και συγκεντρώσεων των ατμοσφαιρικών ρύπων, χωρίς να αποδεικνύουν ότι η θερμοκρασία προκαλεί άμεσα τις παρατηρούμενες μεταβολές στις συγκεντρώσεις τους.

Η στατιστική σημαντικότητα αξιολογήθηκε σε συνδυασμό με την κατεύθυνση και το μέγεθος της σχέσης. Ένα αποτέλεσμα με χαμηλή τιμή p δεν θεωρήθηκε από μόνο του επαρκές για ισχυρό συμπέρασμα, ιδιαίτερα όταν ο συντελεστής συσχέτισης ή η τιμή του R^2 ήταν χαμηλά. Αντίστοιχα, ασθενείς αλλά επαναλαμβανόμενες σχέσεις εξετάστηκαν σε συνάρτηση με τον ρύπο, την εποχή και τον χαρακτήρα του σταθμού. Με τον τρόπο αυτό αποφεύχθηκε η εξίσωση της στατιστικής σημαντικότητας με την ουσιαστική ένταση της σχέσης.

Ιδιαίτερη προσοχή δόθηκε στη διάκριση μεταξύ των αποτελεσμάτων των ημερήσιων μέσων τιμών και εκείνων των μεταβολών μεταξύ διαδοχικών ημερών. Οι σχέσεις στις ημερήσιες μέσες τιμές μπορεί να επηρεάζονται σε σημαντικό βαθμό από την κοινή εποχική διακύμανση της θερμοκρασίας και των ρύπων. Αντίθετα, οι πρώτες διαφορές επικεντρώνονται περισσότερο στις βραχυχρόνιες συν-μεταβολές, χωρίς όμως να εξαλείφουν πλήρως την εποχικότητα, τη χρονική αυτοσυσχέτιση ή την επίδραση άλλων παραγόντων.

Οι συγκεντρώσεις των ατμοσφαιρικών ρύπων διαμορφώνονται από περισσότερους παράγοντες πέρα από τη θερμοκρασία. Σε αυτούς περιλαμβάνονται οι τοπικές εκπομπές, η οδική κυκλοφορία, η βιομηχανική δραστηριότητα, ο άνεμος, η υγρασία, η βροχόπτωση, η φωτοχημική δραστηριότητα, η μεταφορά αέριων μαζών και οι συνθήκες ατμοσφαιρικής διασποράς. Επειδή οι παράγοντες αυτοί δεν εξετάστηκαν ταυτόχρονα στα στατιστικά

μοντέλα, τα αποτελέσματα ερμηνεύονται ως συσχετίσεις στο πλαίσιο της συγκεκριμένης ανάλυσης και όχι ως ανεξάρτητη επίδραση της θερμοκρασίας.

Η ερμηνεία των χωρικών διαφοροποιήσεων βασίστηκε στον χαρακτήρα των σταθμών, λαμβάνοντας παράλληλα υπόψη τους περιορισμούς της αντιστοίχισης των σταθμών ατμοσφαιρικής ρύπανσης με τους μετεωρολογικούς σταθμούς. Οι θερμοκρασιακές παρατηρήσεις της ΕΜΥ χρησιμοποιήθηκαν ως προσεγγιστική αποτύπωση των θερμοκρασιακών συνθηκών των αντίστοιχων περιοχών, καθώς οι σταθμοί δεν ήταν πλήρως συνεγκατεστημένοι.

Συνολικά, τα στατιστικά αποτελέσματα χρησιμοποιήθηκαν για την περιγραφή και τη σύγκριση της σχέσης μεταξύ θερμοκρασίας και ατμοσφαιρικής ρύπανσης στο συγκεκριμένο χωρικό, χρονικό και μεθοδολογικό πλαίσιο. Η τελική ερμηνεία βασίστηκε στη συνδυαστική αξιολόγηση της κατεύθυνσης, της έντασης, της στατιστικής σημαντικότητας, της τιμής R^2 και της συνέπειας των ευρημάτων μεταξύ ρύπων, εποχών και σταθμών.

3.7 Γραφικές απεικονίσεις

Οι γραφικές απεικονίσεις χρησιμοποιήθηκαν επικουρικά προς τη στατιστική ανάλυση, με σκοπό την οπτική διερεύνηση των σχέσεων μεταξύ θερμοκρασίας και ατμοσφαιρικών ρύπων, καθώς και τη συγκριτική παρουσίαση των αποτελεσμάτων ανά σταθμό, ρύπο και εποχή. Η χρήση γραφημάτων κρίθηκε απαραίτητη, καθώς οι αριθμητικοί δείκτες, όπως ο συντελεστής συσχέτισης, ο συντελεστής παλινδρόμησης και το R^2 , συνοψίζουν τη σχέση μεταξύ δύο μεταβλητών, αλλά δεν αποτυπώνουν πάντοτε πλήρως τη μορφή της κατανομής των παρατηρήσεων.

Στην παρούσα εργασία χρησιμοποιήθηκαν κυρίως διαγράμματα διασποράς για την απεικόνιση της σχέσης μεταξύ ημερήσιας μέσης θερμοκρασίας και ημερήσιας συγκέντρωσης κάθε ρύπου. Αντίστοιχα, δημιουργήθηκαν διαγράμματα διασποράς για τη σχέση μεταξύ της ημερήσιας μεταβολής της θερμοκρασίας και της ημερήσιας μεταβολής της συγκέντρωσης κάθε ρύπου. Τα διαγράμματα αυτά επέτρεψαν την οπτική αξιολόγηση της μορφής της σχέσης, της πιθανής γραμμικής τάσης, της διασποράς των παρατηρήσεων

και της παρουσίας ακραίων ή μεμονωμένων τιμών που ενδέχεται να επηρεάζουν τα στατιστικά αποτελέσματα.

Ιδιαίτερη σημασία δόθηκε στη σύγκριση των γραφικών ενδείξεων με τα αριθμητικά αποτελέσματα. Σε περιπτώσεις όπου ένας συντελεστής συσχέτισης ή παλινδρόμησης εμφάνιζε στατιστική σημαντικότητα, τα διαγράμματα χρησιμοποιήθηκαν για να ελεγχθεί εάν η σχέση παρουσίαζε πράγματι σαφή γραμμική μορφή ή εάν επηρεαζόταν από μεγάλη διασπορά, ακραίες τιμές ή ανομοιογενή κατανομή των παρατηρήσεων. Με τον τρόπο αυτό, οι γραφικές απεικονίσεις συνέβαλαν στον έλεγχο της ερμηνευτικής αξιοπιστίας των στατιστικών αποτελεσμάτων.

Όπου κρίθηκε απαραίτητο, τα διαγράμματα συνοδεύτηκαν από γραμμή τάσης, ώστε να αποτυπώνεται οπτικά η κατεύθυνση της γραμμικής σχέσης μεταξύ των μεταβλητών. Η γραμμή τάσης δεν χρησιμοποιήθηκε ως ανεξάρτητο στατιστικό κριτήριο, αλλά ως οπτική υποστήριξη των αποτελεσμάτων της συσχέτισης και της απλής γραμμικής παλινδρόμησης. Παράλληλα, χρησιμοποιήθηκαν συγκριτικές γραφικές απεικονίσεις για την παρουσίαση των αποτελεσμάτων ανά εποχή, σταθμό και ρύπο. Οι απεικονίσεις αυτές συνέβαλαν στην καλύτερη κατανόηση των χωρικών και εποχικών διαφοροποιήσεων και διευκόλυναν τη σύγκριση των σχέσεων που προέκυψαν από τις ημερήσιες μέσες τιμές με εκείνες που προέκυψαν από τις μεταβολές μεταξύ διαδοχικών ημερών.

Ιδιαίτερη έμφαση δόθηκε στην αναγνωσιμότητα και στην ομοιομορφία των γραφημάτων, ώστε οι άξονες, οι μονάδες μέτρησης, οι τίτλοι και οι λεζάντες να είναι σαφείς και να επιτρέπουν την ορθή ερμηνεία τους. Η ομοιόμορφη παρουσίαση των γραφικών αποτελεσμάτων κρίθηκε σημαντική για τη συγκρισιμότητα μεταξύ σταθμών, εποχών και ρύπων, αλλά και για την αποφυγή παρανοήσεων κατά την ανάγνωση των αποτελεσμάτων. Τα γραφήματα δεν χρησιμοποιήθηκαν ως αυτοτελής απόδειξη της ύπαρξης ή της έντασης μιας σχέσης, αλλά ως συμπληρωματικό εργαλείο ελέγχου, ερμηνείας και παρουσίασης.

Η τελική αξιολόγηση των σχέσεων βασίστηκε στον συνδυασμό των γραφικών ενδείξεων με τους αριθμητικούς δείκτες της συσχέτισης και της απλής γραμμικής παλινδρόμησης, ώστε η ερμηνεία να μην εξαρτάται αποκλειστικά από μία μεμονωμένη στατιστική τιμή.

3.8 Περιορισμοί της μεθοδολογίας

Η μεθοδολογική προσέγγιση της παρούσας εργασίας παρέχει ένα συνεπές πλαίσιο για τη διερεύνηση της σχέσης μεταξύ θερμοκρασίας και ατμοσφαιρικής ρύπανσης, παρουσιάζει όμως ορισμένους περιορισμούς που πρέπει να λαμβάνονται υπόψη κατά την ερμηνεία των αποτελεσμάτων. Οι περιορισμοί αυτοί συνδέονται κυρίως με τη φύση των διαθέσιμων δεδομένων, τη χωρική αντιστοίχιση των σταθμών, τη χρονική ανάλυση και τον διμεταβλητό χαρακτήρα των στατιστικών μεθόδων.

Ένας βασικός περιορισμός αφορά τη μη συνεγκατάσταση των σταθμών ατμοσφαιρικής ρύπανσης και των μετεωρολογικών σταθμών. Οι θερμοκρασιακές παρατηρήσεις της ΕΜΥ χρησιμοποιήθηκαν ως προσεγγιστική αναπαράσταση των συνθηκών που επικρατούν στην περιοχή κάθε σταθμού του ΕΔΠΑΡ. Παρότι η αντιστοίχιση πραγματοποιήθηκε με βάση χωρικά, περιβαλλοντικά και χρονικά κριτήρια, δεν είναι δυνατόν να θεωρηθεί ότι οι θερμοκρασιακές συνθήκες των δύο θέσεων ταυτίζονται πλήρως.

Ένας δεύτερος περιορισμός σχετίζεται με τη χρήση της ημερήσιας χρονικής κλίμακας. Η ημερήσια ανάλυση είναι κατάλληλη για τη συγκριτική και εποχική διερεύνηση των σχέσεων, αλλά δεν επιτρέπει την άμεση εξέταση ενδοημερήσιων προτύπων. Φαινόμενα όπως οι πρωινές κορυφώσεις των κυκλοφοριακών ρύπων, οι μεσημβρινές ή απογευματινές αυξήσεις του O_3 και οι βραχυχρόνιες μεταβολές των συνθηκών διασποράς μπορεί να εξομαλύνονται στις ημερήσιες μέσες τιμές.

Ένας τρίτος περιορισμός αφορά τη διαθεσιμότητα και την πληρότητα των δεδομένων. Το τελικό πλήθος παρατηρήσεων διαφοροποιήθηκε μεταξύ σταθμών, ρύπων και εποχών, καθώς κάθε ανάλυση βασίστηκε μόνο στις διαθέσιμες έγκυρες και χρονικά αντιστοιχισμένες παρατηρήσεις. Επομένως, ορισμένοι συνδυασμοί σταθμού και ρύπου μπορεί να εκπροσωπούνται από μεγαλύτερο ή μικρότερο αριθμό παρατηρήσεων, γεγονός που επηρεάζει τη συγκρισιμότητα και την ισχύ των στατιστικών αποτελεσμάτων.

Ένας τέταρτος περιορισμός συνδέεται με τον διμεταβλητό χαρακτήρα της ανάλυσης. Στην παρούσα εργασία εξετάστηκε η σχέση της θερμοκρασίας με κάθε ρύπο χωριστά, χωρίς να ενσωματωθούν σε πολυμεταβλητά υποδείγματα άλλες μετεωρολογικές ή ανθρωπογενείς παράμετροι. Παράγοντες όπως ο άνεμος, η σχετική υγρασία, η βροχόπτωση, η ηλιακή ακτινοβολία, οι εκπομπές, η κυκλοφορία, η μεταφορά αέριων μαζών και η φωτοχημική δραστηριότητα μπορεί να επηρεάζουν σημαντικά τις συγκεντρώσεις των ρύπων και να συνδιαμορφώνουν τις παρατηρούμενες σχέσεις.

Ένας πέμπτος περιορισμός αφορά τη γραμμική φύση των στατιστικών μεθόδων που εφαρμόστηκαν. Η ανάλυση συσχέτισης Pearson και η απλή γραμμική παλινδρόμηση αποτυπώνουν κυρίως γραμμικές σχέσεις μεταξύ των μεταβλητών. Ωστόσο, η σχέση θερμοκρασίας και ατμοσφαιρικής ρύπανσης μπορεί να είναι μη γραμμική ή να διαφοροποιείται ανάλογα με κατώφλια θερμοκρασίας, εποχικές συνθήκες, επίπεδα εκπομπών ή φωτοχημικό καθεστώς.

Επιπλέον, οι αναλύσεις των μεταβολών μεταξύ διαδοχικών ημερών περιορίζουν μέρος της επίδρασης των αργών χρονικών μεταβολών, αλλά δεν εξαλείφουν πλήρως την εποχικότητα, την αυτοσυσχέτιση ή την επίδραση άλλων παραγόντων που μπορεί να μεταβάλλονται από ημέρα σε ημέρα. Για τον λόγο αυτό, τα αποτελέσματα των πρώτων διαφορών ερμηνεύονται συμπληρωματικά προς τα αποτελέσματα των ημερήσιων μέσων τιμών.

Οι παραπάνω περιορισμοί δεν αναιρούν τη χρησιμότητα της ανάλυσης, αλλά οριοθετούν το εύρος των συμπερασμάτων που μπορούν να εξαχθούν. Η παρούσα μεθοδολογία επιτρέπει τη συστηματική αποτύπωση και σύγκριση των στατιστικών σχέσεων μεταξύ θερμοκρασίας και ατμοσφαιρικών ρύπων στο λεκανοπέδιο της Αθήνας, χωρίς όμως να τεκμηριώνει άμεσες αιτιώδεις επιδράσεις ή να απομονώνει πλήρως τον ρόλο της θερμοκρασίας από άλλους περιβαλλοντικούς παράγοντες.

Η μεθοδολογική προσέγγιση που παρουσιάστηκε στο παρόν κεφάλαιο αποτελεί τη βάση για την εμπειρική διερεύνηση που ακολουθεί.

4. Αποτελέσματα

Στο παρόν κεφάλαιο παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της επεξεργασίας, του ποιοτικού ελέγχου και της στατιστικής ανάλυσης των δεδομένων θερμοκρασίας και ατμοσφαιρικής ρύπανσης για την περίοδο 2016–2024. Αρχικά αξιολογούνται η πληρότητα και η καταλληλότητα των διαθέσιμων δεδομένων και παρουσιάζονται τα βασικά περιγραφικά χαρακτηριστικά τους, καθώς και η διαχρονική και εποχική μεταβολή της ημερήσιας μέσης θερμοκρασίας και των συγκεντρώσεων των εξεταζόμενων ατμοσφαιρικών ρύπων.

Στη συνέχεια διερευνάται η στατιστική σχέση μεταξύ της θερμοκρασίας και των συγκεντρώσεων των ρύπων μέσω δύο συμπληρωματικών προσεγγίσεων. Η πρώτη αφορά τη σχέση μεταξύ της ημερήσιας μέσης θερμοκρασίας και της αντίστοιχης ημερήσιας μέσης συγκέντρωσης κάθε ρύπου, ενώ η δεύτερη εξετάζει τη βραχυχρόνια συνδιακύμανση των δύο μεγεθών μέσω της σχέσης μεταξύ των ημερήσιων μεταβολών τους. Οι αναλύσεις πραγματοποιούνται χωριστά ανά ρύπο, εποχή και σταθμό μέτρησης, ώστε να διερευνηθούν πιθανές χρονικές, εποχικές και χωρικές διαφοροποιήσεις ως προς την κατεύθυνση και την ένταση των παρατηρούμενων σχέσεων.

4.1 Πληρότητα και ποιοτικός έλεγχος δεδομένων

Η πληρότητα και η καταλληλότητα των διαθέσιμων δεδομένων αξιολογήθηκαν χωριστά για κάθε σταθμό μέτρησης και εξεταζόμενο ατμοσφαιρικό ρύπο. Κατά τον ποιοτικό έλεγχο αποκλείστηκαν οι ελλείψεις, μη αριθμητικές και μη έγκυρες τιμές, καθώς και οι ημερήσιες παρατηρήσεις που δεν πληρούσαν το προκαθορισμένο κριτήριο χρονικής κάλυψης. Ειδικότερα, μία ημερήσια τιμή θεωρήθηκε έγκυρη όταν ήταν διαθέσιμες τουλάχιστον 18 από τις 24 ωριαίες μετρήσεις.

Δεν εφαρμόστηκε παρεμβολή, αντικατάσταση ή άλλη μέθοδος συμπλήρωσης των ελλειπουσών τιμών. Κατά συνέπεια, οι αναλύσεις βασίστηκαν αποκλειστικά στις διαθέσιμες παρατηρήσεις που πληρούσαν τα καθορισμένα κριτήρια εγκυρότητας. Για κάθε συνδυασμό σταθμού και ρύπου υπολογίστηκαν ο αριθμός των έγκυρων ημερήσιων τιμών, το ποσοστό πληρότητας ως προς το σύνολο των 3.288 ημερολογιακών ημερών της περιόδου 2016–2024, ο αριθμός των ημερών με ταυτόχρονα έγκυρες τιμές θερμοκρασίας και ρύπου,

καθώς και ο αριθμός των έγκυρων ζευγών πραγματικά διαδοχικών ημερών που χρησιμοποιήθηκαν στις αναλύσεις των ημερήσιων μεταβολών.

Τα αποτελέσματα παρουσιάζονται στους Πίνακες 4.1α–4.1ε.

Ρύπος	Έγκυρες ημερήσιες τιμές	Πληρότητα (%)	Κοινές έγκυρες ημέρες θερμοκρασίας και ρύπου	Έγκυρα ζεύγη πραγματικά διαδοχικών ημερών
NO	3.073	93,5	2.871	2.764
NO ₂	3.073	93,5	2.871	2.764
SO ₂	2.761	84,0	2.564	2.450
PM ₁₀	3.073	93,5	2.872	2.727

Πίνακας 4.1α. Πληρότητα και χρονική διαθεσιμότητα των δεδομένων ατμοσφαιρικών ρύπων στον σταθμό Αριστοτέλους κατά την περίοδο 2016–2024.

Ρύπος	Έγκυρες ημερήσιες τιμές	Πληρότητα (%)	Κοινές έγκυρες ημέρες θερμοκρασίας και ρύπου	Έγκυρα ζεύγη πραγματικά διαδοχικών ημερών
NO	3.172	96,5	3.141	3.111
NO ₂	3.172	96,5	3.141	3.111
O ₃	2.743	83,4	2.711	2.661
SO ₂	2.219	67,5	2.196	2.151
PM ₁₀	3.006	91,4	2.975	2.920

Πίνακας 4.1β. Πληρότητα και χρονική διαθεσιμότητα των δεδομένων ατμοσφαιρικών ρύπων στον σταθμό Ελευσίνας κατά την περίοδο 2016–2024.

Ρύπος	Έγκυρες ημερήσιες τιμές	Πληρότητα (%)	Κοινές έγκυρες ημέρες θερμοκρασίας και ρύπου	Έγκυρα ζεύγη πραγματικά διαδοχικών ημερών
NO	2.853	86,8	2.819	2.784
NO ₂	2.853	86,8	2.819	2.784
O ₃	2.973	90,4	2.931	2.864
PM ₁₀	3.065	93,2	3.024	2.954

Πίνακας 4.1γ. Πληρότητα και χρονική διαθεσιμότητα των δεδομένων ατμοσφαιρικών ρύπων στον σταθμό Θρακομακεδόνων κατά την περίοδο 2016–2024.

Ρύπος	Έγκυρες ημερήσιες τιμές	Πληρότητα (%)	Κοινές έγκυρες ημέρες θερμοκρασίας και ρύπου	Έγκυρα ζεύγη πραγματικά διαδοχικών ημερών
NO	2.807	85,4	2.767	2.690
NO ₂	2.803	85,2	2.763	2.684
O ₃	2.850	86,7	2.809	2.724
PM ₁₀	2.970	90,3	2.925	2.810

Πίνακας 4.1δ. Πληρότητα και χρονική διαθεσιμότητα των δεδομένων ατμοσφαιρικών ρύπων στον σταθμό Λυκόβρυσης κατά την περίοδο 2016–2024.

Ρύπος	Έγκυρες ημερήσιες τιμές	Πληρότητα (%)	Κοινές έγκυρες ημέρες θερμοκρασίας και ρύπου	Έγκυρα ζεύγη πραγματικά διαδοχικών ημερών
NO	3.271	99,5	3.056	2.947
NO ₂	3.271	99,5	3.056	2.947
O ₃	3.140	95,5	2.930	2.809
SO ₂	3.061	93,1	2.861	2.744

Πίνακας 4.1ε. Πληρότητα και χρονική διαθεσιμότητα των δεδομένων ατμοσφαιρικών ρύπων στον σταθμό Πατησίων κατά την περίοδο 2016–2024.

Από τους Πίνακες 4.1α–4.1ε προκύπτουν διαφοροποιήσεις στην πληρότητα των δεδομένων τόσο μεταξύ των σταθμών όσο και μεταξύ των εξεταζόμενων ρύπων. Τα υψηλότερα ποσοστά πληρότητας καταγράφηκαν για το NO και το NO₂ στον σταθμό Πατησίων και ανήλθαν σε 99,5%, ενώ το χαμηλότερο ποσοστό παρατηρήθηκε για το SO₂ στον σταθμό Ελευσίνας και διαμορφώθηκε σε 67,5%.

Για τους περισσότερους συνδυασμούς σταθμού και ρύπου, η πληρότητα υπερέβη το 80%, εξασφαλίζοντας εκτεταμένη χρονική κάλυψη της περιόδου μελέτης. Ιδιαίτερα υψηλή διαθεσιμότητα παρουσίασαν τα δεδομένα NO και NO₂ στον σταθμό Πατησίων, καθώς και τα δεδομένα των περισσότερων ρύπων στους σταθμούς Αριστοτέλους, Ελευσίνας και Θρακομακεδόνων. Αντίθετα, χαμηλότερη πληρότητα παρουσίασε κυρίως το SO₂ στον σταθμό Ελευσίνας. Παρότι ο διαθέσιμος αριθμός κοινών ημερών και διαδοχικών ζευγών ήταν αριθμητικά σημαντικός, τα αντίστοιχα αποτελέσματα πρέπει να ερμηνεύονται λαμβάνοντας υπόψη τη μικρότερη χρονική κάλυψη σε σύγκριση με τους υπόλοιπους συνδυασμούς σταθμών και ρύπων.

Ο αριθμός των ημερών με ταυτόχρονα έγκυρες τιμές θερμοκρασίας και συγκέντρωσης του αντίστοιχου ρύπου ήταν, όπως αναμενόταν, μικρότερος ή ίσος με τον αριθμό των έγκυρων ημερήσιων τιμών κάθε ρύπου, καθώς προϋπέθετε την ταυτόχρονη διαθεσιμότητα έγκυρης παρατήρησης και για τις δύο μεταβλητές.

Περαιτέρω μείωση παρατηρήθηκε στον αριθμό των έγκυρων ζευγών πραγματικά διαδοχικών ημερών, επειδή για τον υπολογισμό των ΔT_i και ΔP_i απαιτούνταν διαθέσιμες και έγκυρες παρατηρήσεις τόσο κατά την ημέρα t όσο και κατά την αμέσως προηγούμενη ημερολογιακή ημέρα $t-1$. Επομένως, ακόμη και ένα μεμονωμένο κενό στη χρονοσειρά μπορούσε να αποκλείσει έως και δύο δυνητικά ζεύγη ημερήσιων μεταβολών, ανάλογα με τη θέση του στη χρονοσειρά.

Τέλος, το συνολικό ποσοστό πληρότητας αποτυπώνει την έκταση της διαθέσιμης χρονικής κάλυψης, αλλά δεν προσδιορίζει από μόνο του τη χρονική κατανομή των ελλείψεων. Εάν τα κενά συγκεντρώνονται σε συγκεκριμένα έτη ή εποχές, ενδέχεται να περιορίζεται η αντιπροσωπευτικότητα ορισμένων επιμέρους εποχικών αναλύσεων.

Για τον λόγο αυτό, τα αποτελέσματα εξετάστηκαν σε συνδυασμό με τον διαθέσιμο αριθμό παρατηρήσεων για κάθε σταθμό, ρύπο και εποχή.

4.2 Περιγραφική στατιστική θερμοκρασίας και ρύπων

Για την αρχική αποτύπωση της κεντρικής τάσης, της διασποράς και του εύρους των δεδομένων υπολογίστηκαν βασικά περιγραφικά στατιστικά μεγέθη για την ημερήσια μέση θερμοκρασία και τις ημερήσιες συγκεντρώσεις των εξεταζόμενων ατμοσφαιρικών ρύπων. Ειδικότερα, προσδιορίστηκαν ο αριθμός των έγκυρων παρατηρήσεων, η μέση τιμή, η διάμεσος, η τυπική απόκλιση, η ελάχιστη και η μέγιστη τιμή, καθώς και το 25ο και το 75ο εκατοστημόριο. Η περιγραφική ανάλυση πραγματοποιήθηκε χωριστά για κάθε μετεωρολογικό σταθμό και για κάθε συνδυασμό σταθμού μέτρησης και ρύπου.

4.2.1 Περιγραφικά χαρακτηριστικά της θερμοκρασίας

Για την περιγραφή των θερμοκρασιακών συνθηκών κατά την περίοδο 2016–2024 εξετάστηκαν οι ημερήσιες μέσες θερμοκρασίες στους μετεωρολογικούς σταθμούς Ελευσίνας, Ελληνικού και Τατοΐου. Για κάθε σταθμό υπολογίστηκαν ο αριθμός των έγκυρων ημερήσιων παρατηρήσεων, η μέση τιμή, η διάμεσος, η τυπική απόκλιση, η ελάχιστη και η μέγιστη τιμή, καθώς και το 25ο και το 75ο εκατοστημόριο.

Τα αντίστοιχα περιγραφικά στατιστικά στοιχεία παρουσιάζονται στον Πίνακα 4.2.

Μετεωρολογικός σταθμός	n	Μέση τιμή (°C)	Διάμεσος (°C)	SD (°C)	Min (°C)	P25 (°C)	P75 (°C)	Max (°C)
Ελευσίνα	3.280	19,30	18,70	7,46	−0,80	13,20	25,80	36,90
Ελληνικό	3.220	19,82	19,45	7,07	1,00	14,40	25,95	37,30
Τατόι	3.278	17,25	16,70	7,32	−1,90	11,35	23,60	34,55

Πίνακας 4.2. Περιγραφικά στατιστικά στοιχεία της ημερήσιας μέσης θερμοκρασίας στους μετεωρολογικούς σταθμούς Ελευσίνας, Ελληνικού και Τατοΐου κατά την περίοδο 2016–2024.

Σημείωση: n = αριθμός έγκυρων ημερήσιων παρατηρήσεων, SD = τυπική απόκλιση, Min = ελάχιστη τιμή, Max = μέγιστη τιμή, ενώ P25 και P75 αντιστοιχούν στο 25ο και το 75ο εκατοστημόριο, αντίστοιχα.

Όπως προκύπτει από τον Πίνακα 4.2, η υψηλότερη μέση ημερήσια θερμοκρασία καταγράφηκε στον μετεωρολογικό σταθμό Ελληνικού και ανήλθε σε $19,82^{\circ}\text{C}$, ενώ ακολούθησε ο σταθμός Ελευσίνας με $19,30^{\circ}\text{C}$. Αντίθετα, στον σταθμό Τατοΐου καταγράφηκε η χαμηλότερη μέση τιμή, ίση με $17,25^{\circ}\text{C}$. Η ίδια κατάταξη αποτυπώθηκε και στις τιμές της διαμέσου, οι οποίες κυμάνθηκαν από $16,70^{\circ}\text{C}$ στο Τατόι έως $19,45^{\circ}\text{C}$ στο Ελληνικό, στοιχείο που υποδηλώνει συστηματικά χαμηλότερα θερμοκρασιακά επίπεδα στον σταθμό Τατοΐου σε όλο το κεντρικό τμήμα της κατανομής.

Η μεταβλητότητα των ημερήσιων μέσων θερμοκρασιών ήταν παρόμοια στους τρεις σταθμούς, καθώς η τυπική απόκλιση κυμάνθηκε σε περιορισμένο εύρος, από $7,07^{\circ}\text{C}$ στο Ελληνικό έως $7,46^{\circ}\text{C}$ στην Ελευσίνα. Η μικρή διαφοροποίηση των τιμών της τυπικής απόκλισης δείχνει ότι, παρά τις διαφορές στο μέσο θερμοκρασιακό επίπεδο, η διασπορά των ημερήσιων μέσων θερμοκρασιών ήταν συγκρίσιμη μεταξύ των τριών σταθμών.

Το μεγαλύτερο συνολικό θερμοκρασιακό εύρος καταγράφηκε στην Ελευσίνα, όπου οι ημερήσιες μέσες τιμές εκτείνονταν από $-0,80^{\circ}\text{C}$ έως $36,90^{\circ}\text{C}$. Η υψηλότερη επιμέρους μέγιστη ημερήσια μέση θερμοκρασία καταγράφηκε, ωστόσο, στο Ελληνικό και ανήλθε σε $37,30^{\circ}\text{C}$, ενώ η χαμηλότερη ελάχιστη τιμή παρατηρήθηκε στο Τατόι και ήταν ίση με $-1,90^{\circ}\text{C}$. Τα ευρήματα αυτά αναδεικνύουν διαφοροποιήσεις κυρίως στα ακραία τμήματα των κατανομών και όχι μόνο στις κεντρικές τιμές.

Τόσο το 25ο όσο και το 75ο εκατοστημόριο ήταν χαμηλότερα στο Τατόι σε σύγκριση με τους άλλους δύο σταθμούς. Ειδικότερα, το ενδοτεταρτημοριακό εύρος ήταν $12,60^{\circ}\text{C}$ στην Ελευσίνα, $11,55^{\circ}\text{C}$ στο Ελληνικό και $12,25^{\circ}\text{C}$ στο Τατόι. Η σχετική ομοιότητα των τιμών αυτών επιβεβαιώνει ότι η διασπορά του κεντρικού 50% των παρατηρήσεων ήταν συγκρίσιμη μεταξύ των σταθμών, ενώ η κατανομή του Τατοΐου ήταν συνολικά μετατοπισμένη προς χαμηλότερα θερμοκρασιακά επίπεδα.

4.2.2 Περιγραφικά χαρακτηριστικά των ατμοσφαιρικών ρύπων

Για την περιγραφή της κατανομής των ημερήσιων συγκεντρώσεων των εξεταζόμενων ατμοσφαιρικών ρύπων υπολογίστηκαν βασικά περιγραφικά στατιστικά μεγέθη χωριστά για κάθε σταθμό μέτρησης και ρύπο. Ειδικότερα, προσδιορίστηκαν ο αριθμός των έγκυρων

ημερήσιων παρατηρήσεων, η μέση τιμή, η διάμεσος, η τυπική απόκλιση, η ελάχιστη και η μέγιστη τιμή, καθώς και το 25ο και το 75ο εκατοστημόριο.

Τα αποτελέσματα παρουσιάζονται στους Πίνακες 4.3α–4.3ε.

Ρύπος	n	Μέση τιμή	Διάμεσος	SD	Min	P25	P75	Max
NO	3.073	35,74	19,83	40,14	2,12	10,54	45,25	324,29
NO ₂	3.073	45,67	44,65	13,75	12,17	35,58	54,58	102,50
SO ₂	2.761	4,46	3,75	2,64	2,00	2,25	5,92	29,54
PM ₁₀	3.073	34,65	30,88	18,03	6,21	23,21	41,58	358,29

Πίνακας 4.3α. Περιγραφικά στατιστικά στοιχεία των ημερήσιων συγκεντρώσεων των ατμοσφαιρικών ρύπων στον σταθμό Αριστοτέλους κατά την περίοδο 2016–2024. Οι συγκεντρώσεις εκφράζονται σε $\mu\text{g}/\text{m}^3$.

Όπως προκύπτει από τον Πίνακα 4.3α, η υψηλότερη μέση ημερήσια συγκέντρωση στον σταθμό Αριστοτέλους καταγράφηκε για το NO₂ και ανήλθε σε 45,67 $\mu\text{g}/\text{m}^3$. Ακολούθησαν το NO και τα PM₁₀, με μέσες τιμές 35,74 και 34,65 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, αντίστοιχα. Το NO παρουσίασε τη μεγαλύτερη μεταβλητότητα, με τυπική απόκλιση 40,14 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, ενώ η μέγιστη ημερήσια συγκέντρωσή του ανήλθε σε 324,29 $\mu\text{g}/\text{m}^3$. Η αισθητά υψηλότερη μέση τιμή σε σχέση με τη διάμεσο, σε συνδυασμό με την υψηλή μέγιστη τιμή, παρέχει ένδειξη δεξιάς ασυμμετρίας και παρουσίας περιορισμένου αριθμού ημερών με ιδιαίτερα αυξημένες συγκεντρώσεις. Αντίστοιχα, για τα PM₁₀ η μέγιστη τιμή των 358,29 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ήταν πολλαπλάσια του 75ου εκατοστημορίου των 41,58 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, γεγονός που υποδηλώνει την παρουσία μεμονωμένων ημερών με ιδιαίτερα υψηλές συγκεντρώσεις. Το SO₂ εμφάνισε τη χαμηλότερη μέση συγκέντρωση και τη μικρότερη διασπορά μεταξύ των ρύπων που μετρήθηκαν στον συγκεκριμένο σταθμό.

Ρύπος	n	Μέση τιμή	Διάμεσος	SD	Min	P25	P75	Max
NO	3.172	11,63	7,85	11,57	1,00	3,50	15,58	99,08
NO ₂	3.172	25,62	25,08	10,27	2,88	17,13	32,84	62,33
O ₃	2.743	63,48	64,13	24,63	2,75	44,38	82,72	145,04
SO ₂	2.219	7,58	6,54	4,92	2,00	3,87	10,13	42,48
PM ₁₀	3.006	27,76	25,42	13,41	2,92	19,79	32,83	246,83

Πίνακας 4.3β. Περιγραφικά στατιστικά στοιχεία των ημερήσιων συγκεντρώσεων των ατμοσφαιρικών ρύπων στον σταθμό Ελευσίνας κατά την περίοδο 2016–2024. Οι συγκεντρώσεις εκφράζονται σε $\mu\text{g}/\text{m}^3$.

Στον σταθμό Ελευσίνας, το O₃ παρουσίασε την υψηλότερη μέση ημερήσια συγκέντρωση μεταξύ των εξεταζόμενων ρύπων, ίση με 63,48 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, καθώς και τη μεγαλύτερη τυπική απόκλιση, ίση με 24,63 $\mu\text{g}/\text{m}^3$. Τα PM₁₀ εμφάνισαν μέση συγκέντρωση 27,76 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ και ιδιαίτερα υψηλή μέγιστη τιμή, η οποία ανήλθε σε 246,83 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, έναντι 75ου εκατοστημορίου ίσου με 32,83 $\mu\text{g}/\text{m}^3$. Η μεγάλη αυτή απόκλιση υποδηλώνει ότι η κατανομή επηρεάστηκε από περιορισμένο αριθμό ημερών με υψηλές συγκεντρώσεις.

Για το NO, η μέση τιμή ήταν αισθητά υψηλότερη από τη διάμεσο, γεγονός που παρέχει ένδειξη δεξιάς ασυμμετρίας της κατανομής. Το SO₂ εμφάνισε τη χαμηλότερη μέση συγκέντρωση και τον μικρότερο αριθμό έγκυρων ημερήσιων παρατηρήσεων στον συγκεκριμένο σταθμό.

Ρύπος	n	Μέση τιμή	Διάμεσος	SD	Min	P25	P75	Max
NO	2.853	1,59	1,09	1,21	1,00	1,00	1,58	12,63
NO ₂	2.853	6,96	5,21	5,49	1,00	2,67	9,79	44,83
O ₃	2.973	89,08	88,38	21,41	24,00	72,13	104,54	169,54
PM ₁₀	3.065	19,33	16,46	14,50	1,29	12,21	22,46	414,70

Πίνακας 4.3γ. Περιγραφικά στατιστικά στοιχεία των ημερήσιων συγκεντρώσεων των ατμοσφαιρικών ρύπων στον σταθμό Θρακομακεδόνων κατά την περίοδο 2016–2024. Οι συγκεντρώσεις εκφράζονται σε $\mu\text{g}/\text{m}^3$.

Στον σταθμό Θρακομακεδόνων, το O_3 παρουσίασε σαφώς την υψηλότερη μέση ημερήσια συγκέντρωση, ίση με $89,08 \mu\text{g}/\text{m}^3$, ενώ η διάμεσος διαμορφώθηκε σε $88,38 \mu\text{g}/\text{m}^3$. Η περιορισμένη διαφορά μεταξύ μέσης τιμής και διαμέσου δεν παρέχει ένδειξη έντονης ασυμμετρίας της κατανομής. Αντίθετα, οι συγκεντρώσεις του NO και του NO_2 κυμάνθηκαν σε σημαντικά χαμηλότερα επίπεδα, με μέσες τιμές $1,59$ και $6,96 \mu\text{g}/\text{m}^3$, αντίστοιχα.

Τα PM_{10} παρουσίασαν μέση συγκέντρωση $19,33 \mu\text{g}/\text{m}^3$, αλλά εξαιρετικά υψηλή μέγιστη ημερήσια τιμή, ίση με $414,70 \mu\text{g}/\text{m}^3$. Η μεγάλη απόκλιση της μέγιστης τιμής από το 75ο εκατοστημόριο των $22,46 \mu\text{g}/\text{m}^3$ υποδηλώνει την παρουσία μεμονωμένων ημερών με ιδιαίτερα υψηλές συγκεντρώσεις και έντονη επιμήκυνση της άνω ουράς της κατανομής.

Ρύπος	n	Μέση τιμή	Διάμεσος	SD	Min	P25	P75	Max
NO	2.807	7,87	3,63	10,53	1,00	1,71	9,21	79,21
NO ₂	2.803	20,29	18,46	11,65	1,13	10,63	28,38	62,50
O ₃	2.850	62,73	63,35	25,26	3,75	43,68	82,25	136,42
PM ₁₀	2.970	26,34	23,33	14,67	3,13	17,54	31,92	342,29

Πίνακας 4.3δ. Περιγραφικά στατιστικά στοιχεία των ημερήσιων συγκεντρώσεων των ατμοσφαιρικών ρύπων στον σταθμό Λυκόβρυσης κατά την περίοδο 2016–2024. Οι συγκεντρώσεις εκφράζονται σε $\mu\text{g}/\text{m}^3$.

Στον σταθμό Λυκόβρυσης, το O_3 εμφάνισε την υψηλότερη μέση ημερήσια συγκέντρωση, ίση με $62,73 \mu\text{g}/\text{m}^3$, καθώς και τη μεγαλύτερη τυπική απόκλιση, ίση με $25,26 \mu\text{g}/\text{m}^3$. Τα PM_{10} παρουσίασαν μέση συγκέντρωση $26,34 \mu\text{g}/\text{m}^3$ και ιδιαίτερα υψηλή μέγιστη τιμή, ίση με $342,29 \mu\text{g}/\text{m}^3$, η οποία υπερέβη κατά πολύ το 75ο εκατοστημόριο των $31,92 \mu\text{g}/\text{m}^3$.

Για το NO , η μέση τιμή ήταν υπερδιπλάσια της διαμέσου, ενώ η μέγιστη τιμή ήταν σημαντικά υψηλότερη από το 75ο εκατοστημόριο. Ο συνδυασμός των ευρημάτων αυτών παρέχει ένδειξη έντονης δεξιάς ασυμμετρίας. Για το NO_2 , η απόκλιση μεταξύ μέσης τιμής και διαμέσου ήταν μικρότερη. Ωστόσο, η ακριβής μορφή των κατανομών δεν μπορεί να προσδιοριστεί αποκλειστικά από τη σύγκριση των δύο αυτών μέτρων κεντρικής τάσης.

Ρύπος	n	Μέση τιμή	Διάμεσος	SD	Min	P25	P75	Max
NO	3.271	74,27	63,75	54,12	2,13	32,88	100,81	348,00
NO ₂	3.271	70,97	70,25	21,89	12,88	55,24	85,78	171,83
O ₃	3.140	17,24	12,29	15,34	1,00	5,00	25,76	86,17
SO ₂	3.061	5,96	5,04	3,55	2,00	3,33	7,78	24,63

Πίνακας 4.3ε. Περιγραφικά στατιστικά στοιχεία των ημερήσιων συγκεντρώσεων των ατμοσφαιρικών ρύπων στον σταθμό Πατησίων κατά την περίοδο 2016–2024. Οι συγκεντρώσεις εκφράζονται σε $\mu\text{g}/\text{m}^3$.

Σημείωση για τους Πίνακες 4.3α–4.3ε: n = αριθμός έγκυρων ημερήσιων παρατηρήσεων, SD = τυπική απόκλιση, Min = ελάχιστη τιμή, Max = μέγιστη τιμή, ενώ P25 και P75 αντιστοιχούν στο 25ο και το 75ο εκατοστημόριο, αντίστοιχα.

Στον σταθμό Πατησίων, το NO παρουσίασε την υψηλότερη μέση ημερήσια συγκέντρωση, ίση με $74,27 \mu\text{g}/\text{m}^3$, καθώς και τη μεγαλύτερη μεταβλητότητα, με τυπική απόκλιση $54,12 \mu\text{g}/\text{m}^3$. Υψηλή μέση συγκέντρωση καταγράφηκε επίσης για το NO₂, η οποία ανήλθε σε $70,97 \mu\text{g}/\text{m}^3$ και ήταν πολύ κοντά στη διάμεσο των $70,25 \mu\text{g}/\text{m}^3$. Η μικρή διαφορά μεταξύ των δύο μέτρων δεν παρέχει ένδειξη έντονης ασυμμετρίας της κατανομής του NO₂.

Το O₃ εμφάνισε αισθητή διαφορά μεταξύ μέσης τιμής και διαμέσου, καθώς και μέγιστη τιμή σημαντικά υψηλότερη από το 75ο εκατοστημόριο, παρέχοντας ένδειξη δεξιάς ασυμμετρίας. Το SO₂ παρουσίασε τη χαμηλότερη μέση συγκέντρωση και τη μικρότερη διασπορά μεταξύ των ρύπων που μετρήθηκαν στον συγκεκριμένο σταθμό.

Η συγκριτική εξέταση των σταθμών ανέδειξε σαφείς χωρικές διαφοροποιήσεις στα επίπεδα των εξεταζόμενων ρύπων. Οι υψηλότερες μέσες συγκεντρώσεις NO και NO₂ καταγράφηκαν στον σταθμό Πατησίων, με τιμές $74,27$ και $70,97 \mu\text{g}/\text{m}^3$, αντίστοιχα, ενώ οι χαμηλότερες καταγράφηκαν στον σταθμό Θρακομακεδόνων, με τιμές $1,59$ και $6,96 \mu\text{g}/\text{m}^3$. Αντίθετη χωρική εικόνα παρουσίασε το O₃, με την υψηλότερη μέση συγκέντρωση στους Θρακομακεδόνες και τη χαμηλότερη στα Πατήσια. Το πρότυπο αυτό αναδεικνύει τη διαφορετική χωρική κατανομή των πρωτογενών ρύπων NO και NO₂ και του δευτερογενούς

ρύπου O_3 . Ωστόσο, τα περιγραφικά στατιστικά στοιχεία δεν επαρκούν από μόνα τους για την απόδοση των διαφορών σε συγκεκριμένες πηγές ή ατμοσφαιρικούς μηχανισμούς.

Οι υψηλότερες μέσες συγκεντρώσεις PM_{10} καταγράφηκαν στον σταθμό Αριστοτέλους, με μέση τιμή $34,65 \mu g/m^3$. Παράλληλα, σε όλους τους σταθμούς με διαθέσιμες μετρήσεις PM_{10} , οι μέγιστες τιμές ήταν πολλαπλάσιες του αντίστοιχου 75ου εκατοστημορίου. Το εύρημα αυτό υποδηλώνει έντονη επιμήκυνση της άνω ουράς των κατανομών και παρουσία περιορισμένου αριθμού ημερών με ιδιαίτερα υψηλές συγκεντρώσεις. Η προέλευση αυτών των υψηλών τιμών δεν μπορεί να προσδιοριστεί μέσω της περιγραφικής στατιστικής και απαιτεί συνδυαστική εξέταση πρόσθετων μετεωρολογικών και περιβαλλοντικών πληροφοριών. Οι συγκεντρώσεις SO_2 παρέμειναν γενικά χαμηλότερες σε σύγκριση με τους υπόλοιπους ρύπους στους σταθμούς όπου υπήρχαν διαθέσιμα δεδομένα. Η σύγκριση αυτή είναι αποκλειστικά περιγραφική, καθώς οι εξεταζόμενοι ρύποι διαφέρουν ως προς τις πηγές εκπομπής, τη φυσικοχημική συμπεριφορά, τον χρόνο παραμονής στην ατμόσφαιρα και την περιβαλλοντική και υγειονομική τους σημασία.

Συνολικά, οι αποκλίσεις μεταξύ μέσης τιμής και διαμέσου, οι υψηλές τιμές της τυπικής απόκλισης και η μεγάλη απόσταση των μέγιστων τιμών από το 75ο εκατοστημόριο, κυρίως για το NO και τα PM_{10} , παρέχουν ενδείξεις δεξιά ασύμμετρων κατανομών και παρουσίας περιορισμένου αριθμού ημερών με ιδιαίτερα υψηλές συγκεντρώσεις. Οι παρατηρήσεις αυτές διατηρήθηκαν στις επόμενες αναλύσεις, εφόσον είχαν προηγουμένως κριθεί έγκυρες κατά τη διαδικασία ποιοτικού ελέγχου, ώστε να μην αποκλειστούν πραγματικές ακραίες αλλά περιβαλλοντικά σημαντικές τιμές.

4.3 Διαχρονική μεταβολή της θερμοκρασίας και των ατμοσφαιρικών ρύπων

Για τη διερεύνηση της διαχρονικής εξέλιξης των εξεταζόμενων μεταβλητών υπολογίστηκαν οι ετήσιες μέσες τιμές της ημερήσιας μέσης θερμοκρασίας και των ημερήσιων συγκεντρώσεων των ατμοσφαιρικών ρύπων κατά την περίοδο 2016–2024. Η ανάλυση πραγματοποιήθηκε χωριστά για κάθε μετεωρολογικό σταθμό και για κάθε διαθέσιμο συνδυασμό σταθμού ατμοσφαιρικής ρύπανσης και ρύπου, ώστε να αποτυπωθούν πιθανές χρονικές και χωρικές διαφοροποιήσεις.

Οι ετήσιες μέσες τιμές υπολογίστηκαν αποκλειστικά βάσει των διαθέσιμων και έγκυρων ημερήσιων παρατηρήσεων κάθε έτους, χωρίς εφαρμογή παρεμβολής ή άλλης μεθόδου συμπλήρωσης των ελλειπουσών τιμών. Κατά συνέπεια, ο αριθμός των ημερήσιων παρατηρήσεων που συνέβαλε στον υπολογισμό κάθε ετήσιας μέσης τιμής διαφοροποιήθηκε ανάλογα με την πληρότητα των δεδομένων του αντίστοιχου σταθμού, ρύπου και έτους.

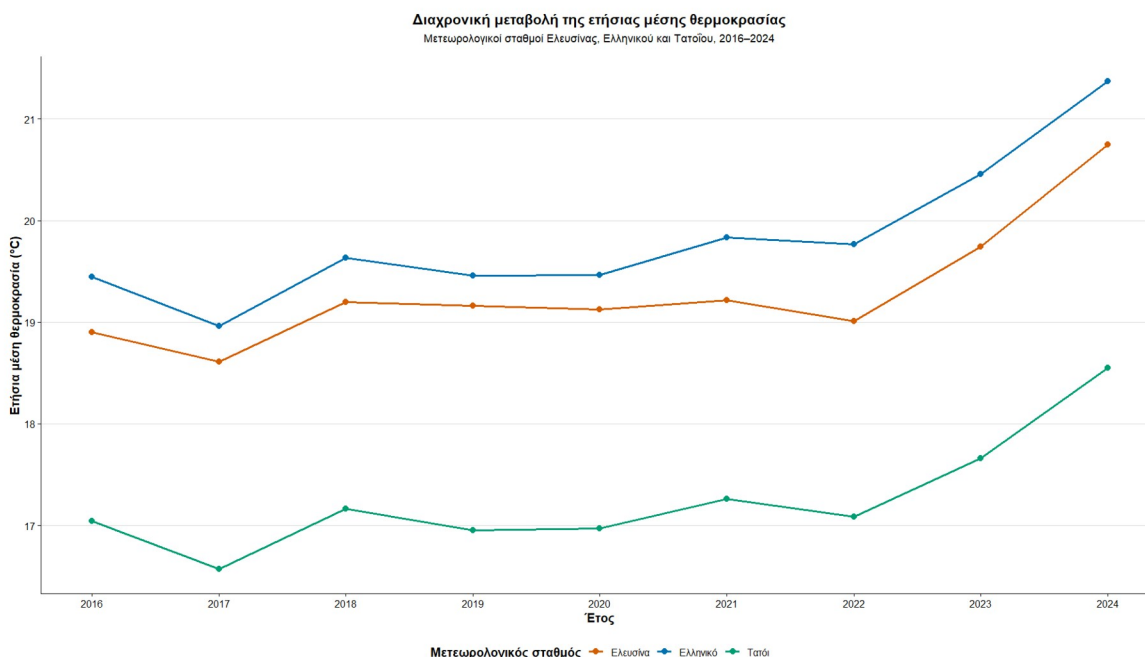
Οι προκύπτουσες ετήσιες μέσες τιμές χρησιμοποιήθηκαν για τη γραφική απεικόνιση και τη συγκριτική αξιολόγηση της διαχρονικής μεταβολής της θερμοκρασίας και των συγκεντρώσεων των ατμοσφαιρικών ρύπων. Η ανάλυση αυτή είχε περιγραφικό χαρακτήρα και δεν χρησιμοποιήθηκε αυτοτελώς για την τεκμηρίωση στατιστικά σημαντικής μακροχρόνιας τάσης.

4.3.1 Διαχρονική μεταβολή της θερμοκρασίας

Για την εξέταση της διαχρονικής εξέλιξης των θερμοκρασιακών συνθηκών υπολογίστηκαν οι ετήσιες μέσες τιμές της ημερήσιας μέσης θερμοκρασίας στους μετεωρολογικούς σταθμούς Ελευσίνας, Ελληνικού και Τατοΐου για κάθε έτος της περιόδου 2016–2024. Η κοινή απεικόνιση των τριών σταθμών επιτρέπει τόσο την παρακολούθηση των μεταβολών από έτος σε έτος όσο και τη σύγκριση των θερμοκρασιακών επιπέδων μεταξύ των εξεταζόμενων περιοχών.

Η συγκεκριμένη παρουσίαση παρέχει μια συνοπτική εικόνα της χρονικής μεταβλητότητας της θερμοκρασίας και επιτρέπει τον εντοπισμό ετών με σχετικά υψηλότερες ή χαμηλότερες μέσες τιμές. Παράλληλα, αναδεικνύει τις διαφοροποιήσεις μεταξύ των σταθμών, οι οποίες μπορεί να συνδέονται με τοπικά γεωγραφικά και μικροκλιματικά χαρακτηριστικά, όπως η απόσταση από τη θάλασσα, το υψόμετρο και ο βαθμός αστικοποίησης.

Τα αποτελέσματα παρουσιάζονται στο Σχήμα 4.1.



Σχήμα 4.1. Διαχρονική μεταβολή της ετήσιας μέσης θερμοκρασίας στους μετεωρολογικούς σταθμούς Ελευσίνας, Ελληνικού και Τατοΐου κατά την περίοδο 2016–2024.

Όπως προκύπτει από το Σχήμα 4.1, οι ετήσιες μέσες θερμοκρασίες παρουσίασαν παρόμοιο πρότυπο διαχρονικής μεταβολής στους τρεις μετεωρολογικούς σταθμούς. Το Ελληνικό κατέγραψε συστηματικά τις υψηλότερες ετήσιες μέσες τιμές, ενώ το Τατόι τις χαμηλότερες σε όλη την εξεταζόμενη περίοδο. Η σταθερή αυτή κατάταξη υποδηλώνει διατήρηση των σχετικών διαφορών του θερμοκρασιακού επιπέδου μεταξύ των τριών περιοχών.

Μετά τη μείωση που καταγράφηκε το 2017, οι ετήσιες μέσες θερμοκρασίες εμφάνισαν διακυμάνσεις κατά την περίοδο 2018–2022, χωρίς να παρατηρείται συνεχής μονοτονική μεταβολή. Ωστόσο, κατά τα έτη 2023 και 2024 καταγράφηκε σαφής μετατόπιση προς υψηλότερες τιμές και στους τρεις σταθμούς. Το 2024 παρουσίασε τις υψηλότερες ετήσιες μέσες θερμοκρασίες ολόκληρης της εξεταζόμενης περιόδου, με τιμές περίπου 21,4 °C στο Ελληνικό, 20,8 °C στην Ελευσίνα και 18,6 °C στο Τατόι.

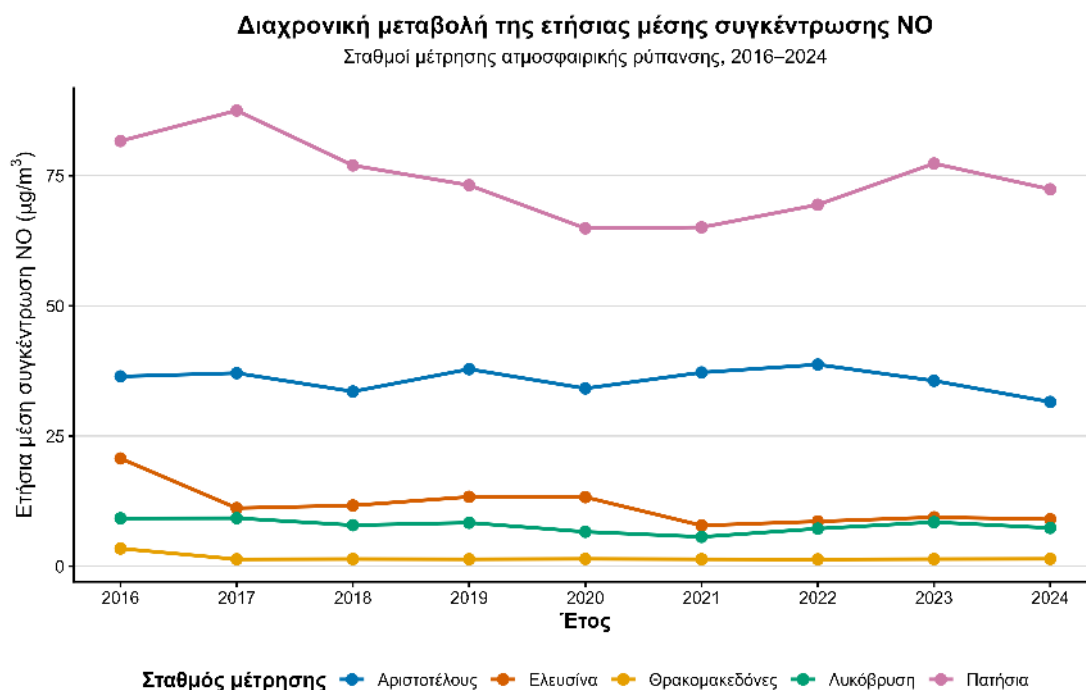
Η σχεδόν παράλληλη εξέλιξη των τριών χρονοσειρών υποδηλώνει παρόμοιο πρότυπο ετήσιων διακυμάνσεων στις εξεταζόμενες περιοχές. Παράλληλα, η απόσταση μεταξύ των σταθμών παρέμεινε σχετικά σταθερή, γεγονός που υποδηλώνει ότι οι ετήσιες μεταβολές

συνυπήρχαν με διατηρούμενες χωρικές διαφοροποιήσεις στο απόλυτο θερμοκρασιακό επίπεδο.

Η ταυτόχρονη καταγραφή των υψηλότερων τιμών το 2024 και στους τρεις σταθμούς αποτελεί ισχυρό περιγραφικό εύρημα για την εξεταζόμενη περίοδο. Ωστόσο, η εννιαετής διάρκεια της χρονοσειράς και η απουσία ειδικού στατιστικού ελέγχου τάσης δεν επιτρέπουν την εξαγωγή ασφαλούς συμπεράσματος περί μακροχρόνιας κλιματικής τάσης αποκλειστικά από το συγκεκριμένο διάγραμμα.

4.3.2 Διαχρονική μεταβολή των ατμοσφαιρικών ρύπων

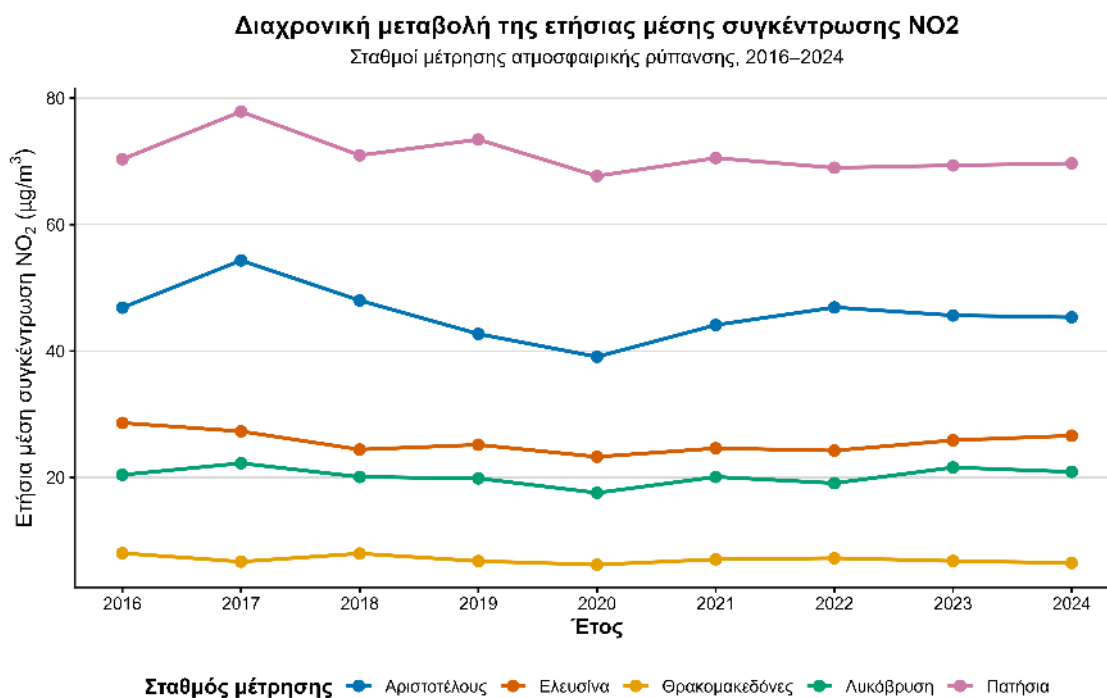
Για τη διερεύνηση της διαχρονικής εξέλιξης της ατμοσφαιρικής ρύπανσης υπολογίστηκαν οι ετήσιες μέσες συγκεντρώσεις των εξεταζόμενων ρύπων ανά σταθμό μέτρησης κατά την περίοδο 2016–2024. Η παρουσίαση πραγματοποιήθηκε χωριστά για κάθε ρύπο, ώστε να καταστεί δυνατή η σύγκριση της χρονικής μεταβολής των συγκεντρώσεων μεταξύ των διαθέσιμων σταθμών.



Σχήμα 4.2. Διαχρονική μεταβολή της ετήσιας μέσης συγκέντρωσης NO στους σταθμούς Αριστοτέλους, Ελευσίνας, Θρακομακεδόνων, Λυκόβρυσης και Πατησίων κατά την περίοδο 2016–2024.

Η διαχρονική εξέλιξη του NO, όπως απεικονίζεται στο Σχήμα 4.2, χαρακτηρίζεται από σαφείς διαφορές μεταξύ των σταθμών. Οι υψηλότερες ετήσιες μέσες συγκεντρώσεις καταγράφηκαν στον σταθμό Πατησίων σε όλη την εξεταζόμενη περίοδο, ενώ ακολούθησε ο σταθμός Αριστοτέλους. Στην Ελευσίνα και στη Λυκόβρυση παρατηρήθηκαν αισθητά χαμηλότερες τιμές, ενώ οι Θρακομακεδόνες εμφάνισαν σταθερά τις χαμηλότερες συγκεντρώσεις.

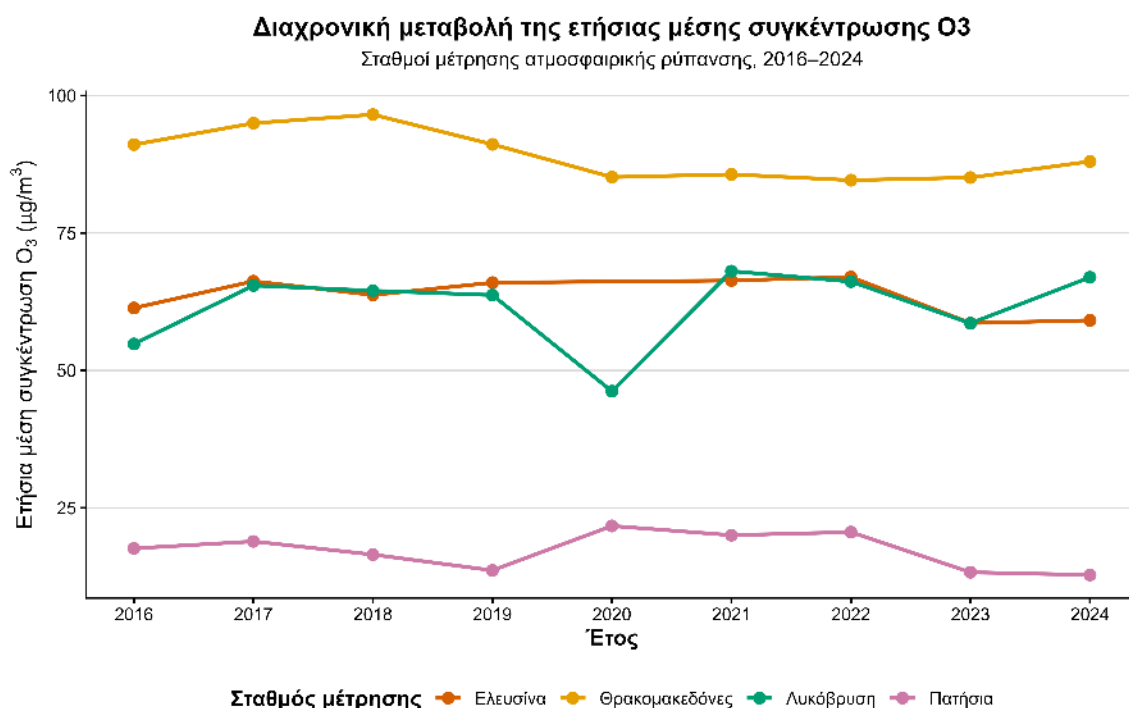
Στον σταθμό Πατησίων οι ετήσιες μέσες συγκεντρώσεις μειώθηκαν από το 2017 έως το 2020, αυξήθηκαν εκ νέου έως το 2023 και παρουσίασαν μικρή υποχώρηση το 2024. Στον σταθμό Αριστοτέλους οι ετήσιες μεταβολές ήταν ηπιότερες, χωρίς σαφή μονοτονική εξέλιξη. Στην Ελευσίνα καταγράφηκε αισθητή μείωση μεταξύ 2019 και 2021, ενώ κατά τα επόμενα έτη οι τιμές παρέμειναν σε χαμηλότερα επίπεδα σε σχέση με την αρχή της περιόδου. Η σταθερή διαφοροποίηση μεταξύ των σταθμών υποδηλώνει έντονη χωρική ετερογένεια ως προς τα επίπεδα του NO.



Σχήμα 4.3. Διαχρονική μεταβολή της ετήσιας μέσης συγκέντρωσης NO₂ στους σταθμούς Αριστοτέλους, Ελευσίνας, Θρακομακεδόνων, Λυκόβρυσης και Πατησίων κατά την περίοδο 2016–2024.

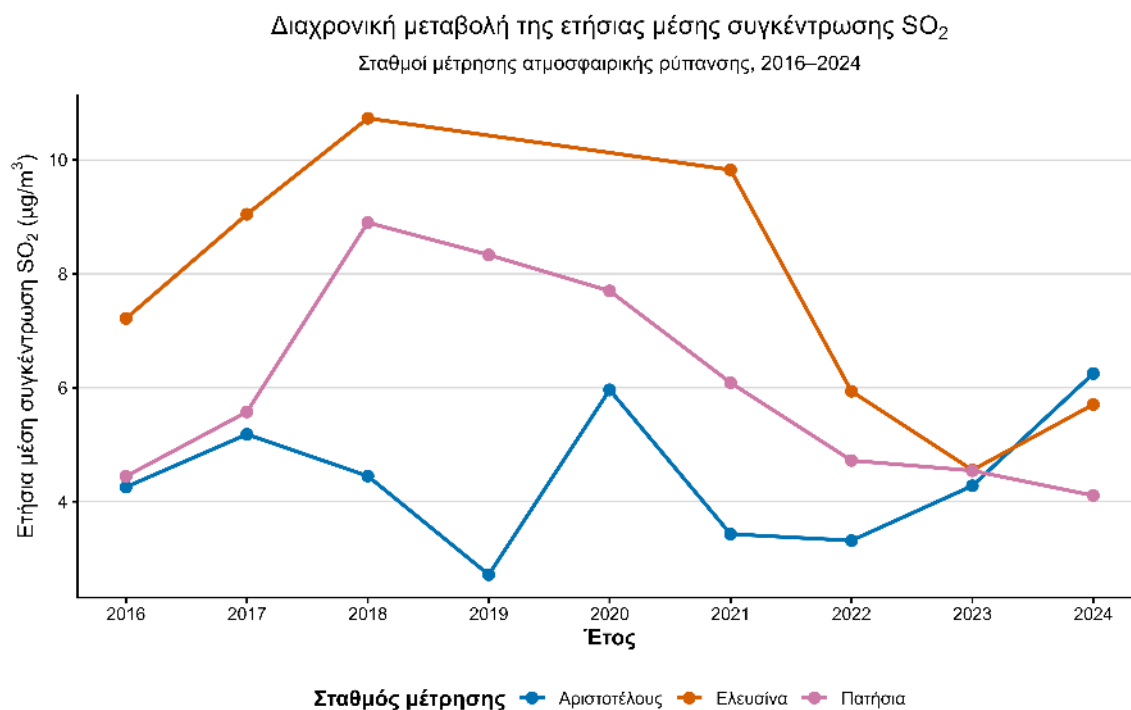
Στο Σχήμα 4.3 αποτυπώνονται οι σταθερά υψηλότερες συγκεντρώσεις NO_2 στον σταθμό Πατησίων καθ' όλη την περίοδο μελέτης. Ο σταθμός Αριστοτέλους ακολούθησε σε χαμηλότερα επίπεδα, ενώ η Ελευσίνα και η Λυκόβρυση εμφάνισαν ενδιάμεσες συγκεντρώσεις. Οι χαμηλότερες ετήσιες μέσες τιμές καταγράφηκαν σταθερά στους Θρακομακεδόνες.

Στον σταθμό Πατησίων παρατηρήθηκαν διακυμάνσεις έως το 2020, μετά το οποίο οι συγκεντρώσεις διατηρήθηκαν σε σχετικά σταθερό επίπεδο. Στον σταθμό Αριστοτέλους καταγράφηκε μείωση έως το 2020 και μεταγενέστερη αύξηση κατά την περίοδο 2021–2022, με μικρές μεταβολές στα δύο τελευταία έτη. Στην Ελευσίνα και στη Λυκόβρυση οι ετήσιες διαφοροποιήσεις ήταν γενικά ηπιότερες. Η διατήρηση της ίδιας κατάταξης των σταθμών κατά το μεγαλύτερο μέρος της περιόδου αναδεικνύει σταθερές χωρικές διαφοροποιήσεις στα επίπεδα του NO_2 .



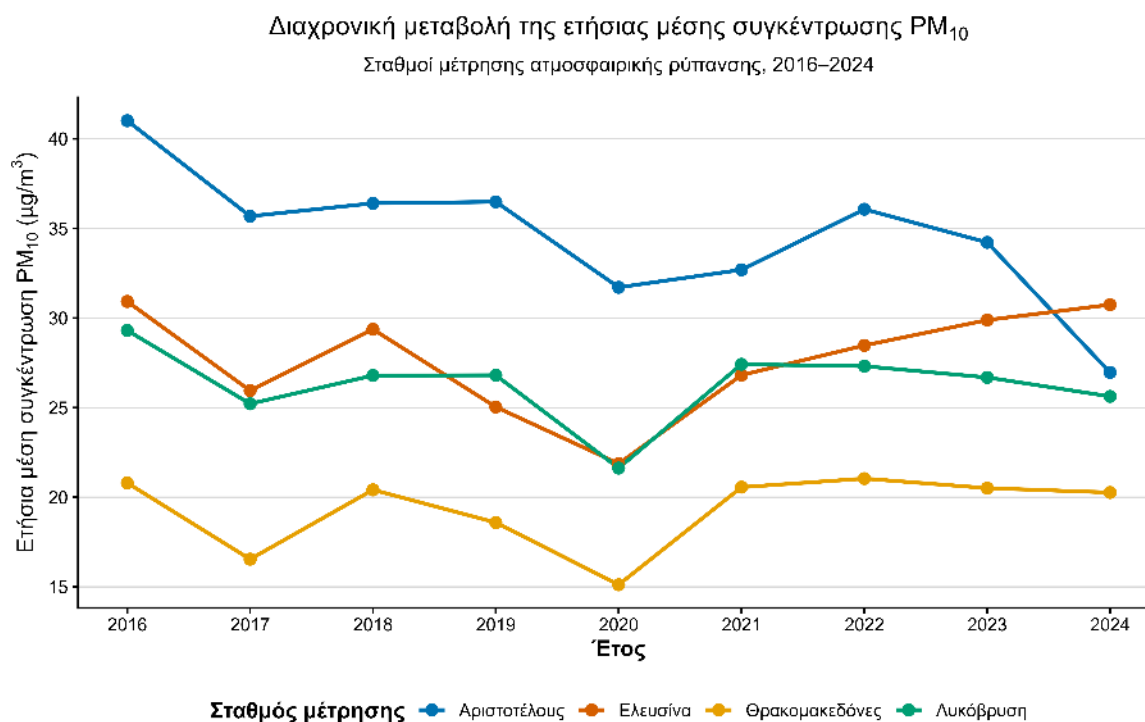
Σχήμα 4.4. Διαχρονική μεταβολή της ετήσιας μέσης συγκέντρωσης O_3 στους σταθμούς Ελευσίνας, Θρακομακεδόνων, Λυκόβρυσης και Πατησίων κατά την περίοδο 2016–2024.

Διαφορετική χωρική εικόνα παρατηρείται για το O_3 , σύμφωνα με το Σχήμα 4.4. Οι Θρακομακεδόνες παρουσίασαν τις υψηλότερες ετήσιες μέσες συγκεντρώσεις σε όλα τα εξεταζόμενα έτη, ενώ ο σταθμός Πατησίων τις χαμηλότερες. Η Ελευσίνα και η Λυκόβρυση κινήθηκαν σε ενδιάμεσα και, κατά το μεγαλύτερο μέρος της περιόδου, παρόμοια επίπεδα. Στους Θρακομακεδόνες οι συγκεντρώσεις αυξήθηκαν έως το 2018 και στη συνέχεια υποχώρησαν, ενώ το 2024 καταγράφηκε μικρή αύξηση σε σχέση με τα αμέσως προηγούμενα έτη. Στη Λυκόβρυση παρατηρήθηκαν εντονότερες μεταβολές από έτος σε έτος, με χαρακτηριστική υποχώρηση το 2020 και απότομη αύξηση το 2021. Στον σταθμό Πατησίων οι συγκεντρώσεις παρέμειναν αισθητά χαμηλότερες, με τις μικρότερες ετήσιες μέσες τιμές να καταγράφονται το 2023 και το 2024. Η αντίστροφη χωρική κατάταξη του O_3 σε σχέση με το NO και το NO_2 αποτελεί σαφές περιγραφικό εύρημα, χωρίς όμως να επαρκεί από μόνη της για την απόδοση των διαφορών σε συγκεκριμένους φωτοχημικούς ή χωρικούς μηχανισμούς.



Σχήμα 4.5. Διαχρονική μεταβολή της ετήσιας μέσης συγκέντρωσης SO_2 στους σταθμούς Αριστοτέλους, Ελευσίνας και Πατησίων κατά την περίοδο 2016–2024.

Η χρονική μεταβολή του SO_2 παρουσιάζει μεγαλύτερη ανομοιογένεια μεταξύ των διαθέσιμων σταθμών, όπως προκύπτει από το Σχήμα 4.5. Η Ελευσίνα εμφάνισε γενικά τις υψηλότερες συγκεντρώσεις κατά το μεγαλύτερο μέρος της περιόδου, με τη μέγιστη ετήσια μέση τιμή να καταγράφεται το 2018. Κατά τα επόμενα έτη ακολούθησε σταδιακή μείωση, η οποία ήταν εντονότερη μεταξύ 2021 και 2023, ενώ το 2024 παρατηρήθηκε μικρή αύξηση. Στον σταθμό Πατησίων καταγράφηκε επίσης αύξηση έως το 2018 και στη συνέχεια γενικά πτωτική μεταβολή έως το 2024. Αντίθετα, ο σταθμός Αριστοτέλους παρουσίασε εντονότερες εναλλαγές, με χαμηλή τιμή το 2019, απότομη αύξηση το 2020, νέα υποχώρηση κατά τα έτη 2021–2022 και αύξηση το 2024. Η ερμηνεία των αποτελεσμάτων της Ελευσίνας πρέπει να γίνεται με ιδιαίτερη προσοχή, λόγω της συγκριτικά χαμηλότερης συνολικής πληρότητας των δεδομένων SO_2 και της ενδεχόμενης διαφοροποίησης του αριθμού των διαθέσιμων παρατηρήσεων μεταξύ των ετών.



Σχήμα 4.6. Διαχρονική μεταβολή της ετήσιας μέσης συγκέντρωσης PM_{10} στους σταθμούς Αριστοτέλους, Ελευσίνας, Θρακομακεδόνων και Λυκόβρυσης κατά την περίοδο 2016–2024.

Από τη συγκριτική εξέταση των χρονοσειρών του Σχήματος 4.6 προκύπτει ότι ο σταθμός Αριστοτέλους παρουσίασε γενικά τις υψηλότερες ετήσιες μέσες συγκεντρώσεις PM_{10} κατά το μεγαλύτερο μέρος της περιόδου, ενώ οι Θρακομακεδόνες τις χαμηλότερες. Η Ελευσίνα και η Λυκόβρυση κινήθηκαν σε ενδιάμεσα επίπεδα, εμφανίζοντας παρόμοια διαχρονική μεταβολή σε αρκετά έτη.

Το 2020 καταγράφηκε μείωση των ετήσιων μέσων συγκεντρώσεων σε όλους τους σταθμούς σε σύγκριση με το 2019. Από το 2021 και μετά παρατηρήθηκε αύξηση σε αρκετές από τις εξεταζόμενες χρονοσειρές, χωρίς όμως η μεταβολή να είναι ομοιόμορφη σε όλους τους σταθμούς και σε όλα τα έτη. Ιδιαίτερα έντονη ήταν η υποχώρηση στον σταθμό Αριστοτέλους το 2024, με αποτέλεσμα η ετήσια μέση συγκέντρωση να διαμορφωθεί χαμηλότερα από την αντίστοιχη τιμή της Ελευσίνας. Οι μεταβολές αυτές περιγράφουν τις διαφορές των ετήσιων μέσων τιμών, χωρίς να τεκμηριώνουν από μόνες τους συγκεκριμένη αιτία ή στατιστικά σημαντική μακροχρόνια τάση.

Η συνολική εξέταση των αποτελεσμάτων αναδεικνύει διακριτά χωρικά και χρονικά πρότυπα ανά ρύπο. Οι υψηλότερες συγκεντρώσεις NO και NO_2 καταγράφηκαν στον σταθμό Πατησίων, ενώ οι Θρακομακεδόνες παρουσίασαν τις χαμηλότερες τιμές των συγκεκριμένων ρύπων και τις υψηλότερες συγκεντρώσεις O_3 . Για το SO_2 παρατηρήθηκαν εντονότερες μεταβολές από έτος σε έτος, χωρίς κοινό χρονικό πρότυπο μεταξύ των διαθέσιμων σταθμών. Οι συγκεντρώσεις PM_{10} διαφοροποιήθηκαν επίσης χωρικά και χρονικά, με τον σταθμό Αριστοτέλους να εμφανίζει γενικά υψηλότερες ετήσιες μέσες τιμές και τους Θρακομακεδόνες χαμηλότερες.

Συνεπώς, η διαχρονική μεταβολή της ατμοσφαιρικής ρύπανσης δεν ήταν ομοιόμορφη, αλλά διαφοροποιήθηκε ανάλογα με τον εξεταζόμενο ρύπο, τον σταθμό μέτρησης και το έτος. Ωστόσο, οι παρατηρούμενες μεταβολές πρέπει να ερμηνεύονται ως περιγραφικά ευρήματα, καθώς δεν εφαρμόστηκε ειδικός στατιστικός έλεγχος χρονικής τάσης και ο αριθμός των έγκυρων ημερήσιων παρατηρήσεων που συνέβαλε στον υπολογισμό των ετήσιων μέσων τιμών ενδέχεται να διαφοροποιήθηκε μεταξύ σταθμών και ετών.

4.4 Εποχική μεταβολή της θερμοκρασίας και των ατμοσφαιρικών ρύπων

Για τη διερεύνηση των εποχικών διαφοροποιήσεων, οι ημερήσιες τιμές της θερμοκρασίας και οι ημερήσιες συγκεντρώσεις των εξεταζόμενων ατμοσφαιρικών ρύπων ταξινομήθηκαν στις τέσσερις εποχές του έτους. Ο χειμώνας περιέλαβε τους μήνες Δεκέμβριο έως Φεβρουάριο, η άνοιξη τους μήνες Μάρτιο έως Μάιο, το καλοκαίρι τους μήνες Ιούνιο έως Αύγουστο και το φθινόπωρο τους μήνες Σεπτέμβριο έως Νοέμβριο.

Η εποχική κατανομή των τιμών εξετάστηκε χωριστά για τη θερμοκρασία και για κάθε ατμοσφαιρικό ρύπο, με σκοπό την ανάδειξη διαφοροποιήσεων μεταξύ των εποχών και των σταθμών μέτρησης. Η αξιολόγηση βασίστηκε στη συγκριτική εξέταση των αντίστοιχων εποχικών τιμών και είχε περιγραφικό χαρακτήρα: συνεπώς, τα παρατηρούμενα πρότυπα δεν ερμηνεύονται από μόνα τους ως στατιστικά σημαντικές εποχικές διαφορές.

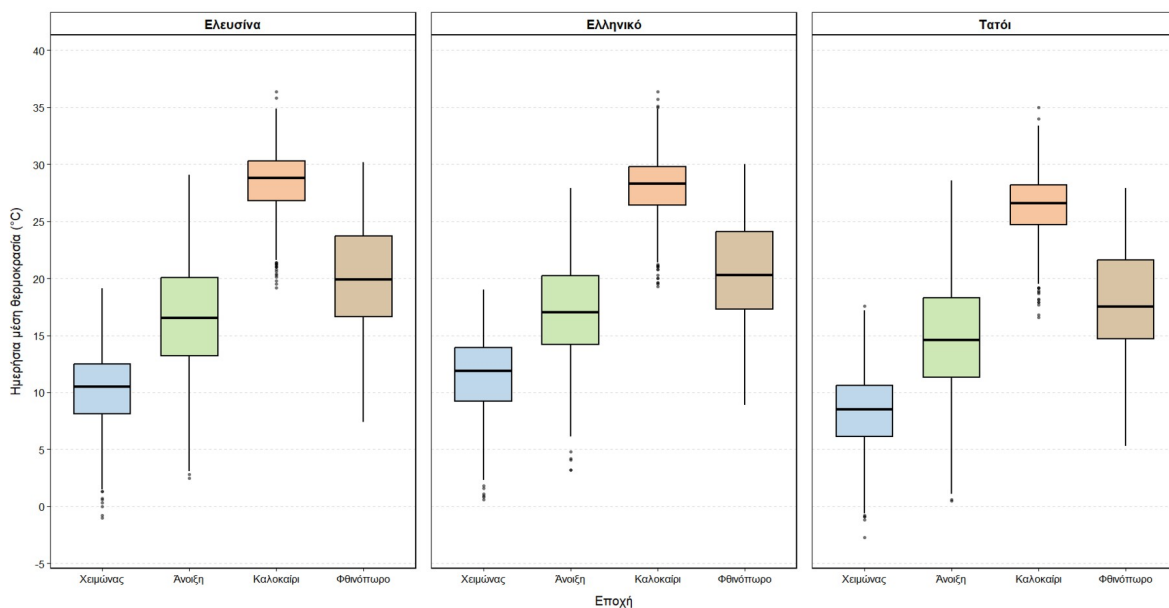
4.4.1 Εποχική μεταβολή της θερμοκρασίας

Για την αποτύπωση της εποχικής συμπεριφοράς της θερμοκρασίας, οι ημερήσιες μέσες τιμές των μετεωρολογικών σταθμών Ελευσίνας, Ελληνικού και Τατοΐου ομαδοποιήθηκαν ανά εποχή. Η παρουσίασή τους με διαγράμματα πλαισίου και απολήξεων επιτρέπει τη σύγκριση των κεντρικών τιμών, της διασποράς και της συνολικής μεταβλητότητας κάθε εποχικής περιόδου.

Με τον τρόπο αυτό αναδεικνύεται ο βαθμός διαφοροποίησης μεταξύ χειμώνα, άνοιξης, καλοκαιριού και φθινοπώρου, καθώς και το κατά πόσο το εποχικό πρότυπο παραμένει κοινό ή μεταβάλλεται μεταξύ των τριών σταθμών. Η σύγκριση επιτρέπει επίσης τον εντοπισμό εποχών με μεγαλύτερη διακύμανση και παρατηρήσεων που αποκλίνουν από το κυρίαρχο εύρος της κατανομής.

Οι διαφοροποιήσεις μεταξύ των σταθμών μπορούν να συνδέονται με χαρακτηριστικά όπως το υψόμετρο, η απόσταση από τη θάλασσα και η μορφολογία κάθε περιοχής. Η εποχική ανάλυση παρέχει, επομένως, το βασικό θερμοκρασιακό υπόβαθρο για την ερμηνεία των διαφοροποιήσεων που εξετάζονται στη συνέχεια για τους ατμοσφαιρικούς ρύπους.

Τα αποτελέσματα παρουσιάζονται στο Σχήμα 4.7.



Σχήμα 4.7. Εποχική κατανομή της ημερήσιας μέσης θερμοκρασίας στους μετεωρολογικούς σταθμούς Ελευσίνας, Ελληνικού και Τατοΐου κατά την περίοδο 2016–2024.

Όπως προκύπτει από το Σχήμα 4.7, η κατανομή της ημερήσιας μέσης θερμοκρασίας παρουσίασε σαφή εποχική διαφοροποίηση και στους τρεις μετεωρολογικούς σταθμούς. Οι χαμηλότερες διάμεσες τιμές καταγράφηκαν τον χειμώνα, ακολούθησε μετατόπιση των κατανομών προς υψηλότερα θερμοκρασιακά επίπεδα την άνοιξη και οι υψηλότερες διάμεσες τιμές εμφανίστηκαν το καλοκαίρι. Κατά το φθινόπωρο παρατηρήθηκε εκ νέου μετατόπιση προς χαμηλότερες τιμές, χωρίς ωστόσο οι θερμοκρασίες να υποχωρούν στα χειμερινά επίπεδα.

Το Ελληνικό εμφάνισε γενικά τις υψηλότερες διάμεσες θερμοκρασίες, ενώ το Τατόι τις χαμηλότερες σε όλες τις εποχές. Η Ελευσίνα παρουσίασε ενδιάμεσες τιμές, με τη θερινή της κατανομή να βρίσκεται σχετικά κοντά σε εκείνη του Ελληνικού. Η σταθερή αυτή κατάταξη αναδεικνύει τη διατήρηση χωρικών διαφορών στα θερμοκρασιακά επίπεδα ανεξάρτητα από την εποχή.

Το ενδοτεταρτημοριακό εύρος ήταν γενικά μεγαλύτερο κατά την άνοιξη και το φθινόπωρο, γεγονός που υποδηλώνει αυξημένη μεταβλητότητα του κεντρικού 50% των ημερήσιων παρατηρήσεων κατά τις μεταβατικές εποχές. Αντίθετα, οι θερινές κατανομές ήταν περισσότερο συγκεντρωμένες γύρω από τις αντίστοιχες διαμέσους. Το πρότυπο αυτό ήταν

κοινό και στους τρεις σταθμούς, αν και το ακριβές εύρος των κατανομών διαφοροποιήθηκε μεταξύ τους.

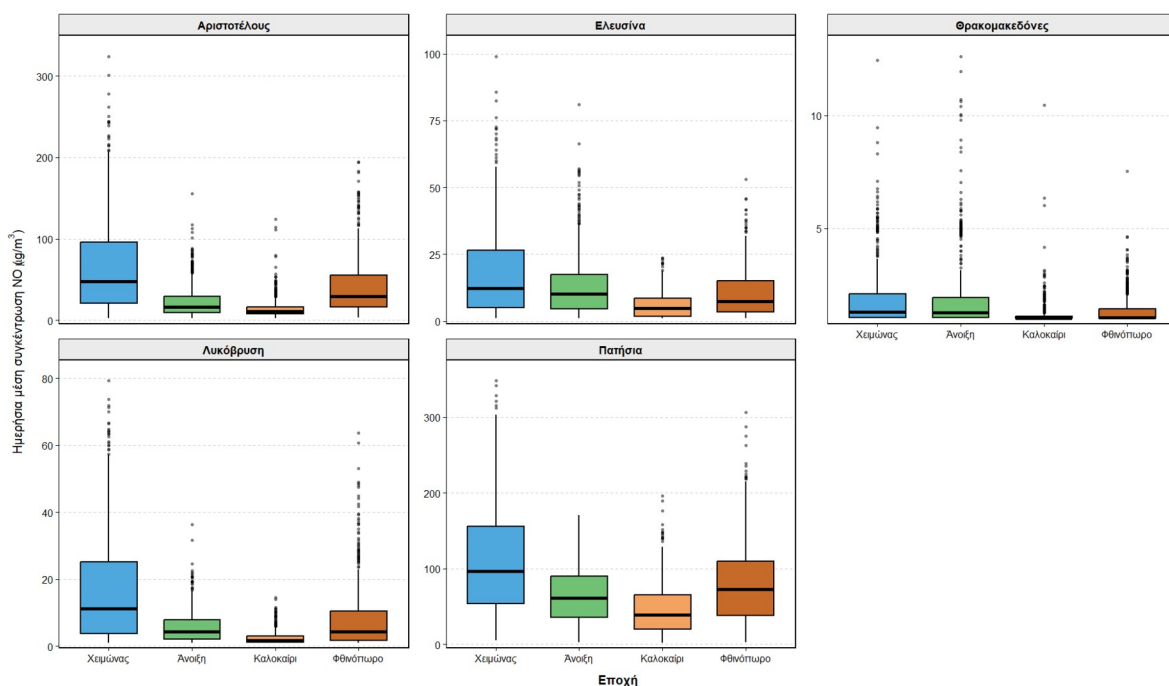
Παρατηρήθηκαν επίσης τιμές πέρα από τις απολήξεις των boxplots, κυρίως κατά τον χειμώνα και το καλοκαίρι. Οι τιμές αυτές αντιστοιχούν σε παρατηρήσεις που αποκλίνουν από το κύριο σώμα της κατανομής σύμφωνα με τον κανόνα κατασκευής των διαγραμμάτων και δεν πρέπει να θεωρούνται αυτομάτως εσφαλμένες ή μη έγκυρες. Εφόσον είχαν προηγουμένως περάσει τον ποιοτικό έλεγχο, διατηρήθηκαν στην ανάλυση ως δυνητικά πραγματικές ακραίες θερμοκρασιακές παρατηρήσεις.

4.4.2 Εποχική μεταβολή των ατμοσφαιρικών ρύπων

Η εποχική συμπεριφορά των ατμοσφαιρικών ρύπων εξετάστηκε με βάση τις ημερήσιες συγκεντρώσεις τους στους επιλεγμένους σταθμούς μέτρησης. Για κάθε ρύπο, οι παρατηρήσεις ομαδοποιήθηκαν στις τέσσερις εποχές του έτους και παρουσιάστηκαν με διαγράμματα πλαισίου και απολήξεων. Η συγκεκριμένη απεικόνιση επιτρέπει τη σύγκριση της διαμέσου, της διασποράς, του συνολικού εύρους των τιμών και της εμφάνισης ακραίων παρατηρήσεων ανά εποχή και σταθμό. Η χωριστή παρουσίαση ανά ρύπο συμβάλλει στην ανάδειξη των ιδιαίτερων εποχικών τάσεων που χαρακτηρίζουν καθέναν από αυτούς, καθώς και των διαφορών που παρατηρούνται μεταξύ των επιμέρους σταθμών. Με τον τρόπο αυτό καθίσταται δυνατή η αναγνώριση των περιόδων κατά τις οποίες εμφανίζονται υψηλότερες συγκεντρώσεις, αυξημένη μεταβλητότητα ή μεγαλύτερη συχνότητα ακραίων τιμών. Παράλληλα, διευκολύνεται η διερεύνηση του κατά πόσο τα εποχικά πρότυπα παραμένουν σταθερά σε διαφορετικούς τύπους αστικού περιβάλλοντος ή διαφοροποιούνται ανάλογα με τα ιδιαίτερα χαρακτηριστικά κάθε θέσης μέτρησης.

Αρχικά εξετάζεται το NO, για το οποίο συγκρίνονται οι εποχικές κατανομές των ημερήσιων συγκεντρώσεων στους πέντε διαθέσιμους σταθμούς. Η σύγκριση αυτή επιτρέπει να εκτιμηθεί τόσο η ένταση της εποχικής διαφοροποίησης όσο και ο βαθμός στον οποίο το σχετικό πρότυπο μεταβάλλεται από σταθμό σε σταθμό. Ιδιαίτερη έμφαση δίνεται στις διαφορές μεταξύ των ψυχρότερων και θερμότερων περιόδων του έτους, καθώς και στη μεταβλητότητα που εμφανίζεται σε κάθε σταθμό.

Τα αποτελέσματα παρουσιάζονται στο Σχήμα 4.8.



Σχήμα 4.8. Εποχική κατανομή της ημερήσιας μέσης συγκέντρωσης NO στους σταθμούς Αριστοτέλους, Ελευσίνας, Θρακομακεδόνων, Λυκόβρυσης και Πατησίων κατά την περίοδο 2016–2024.

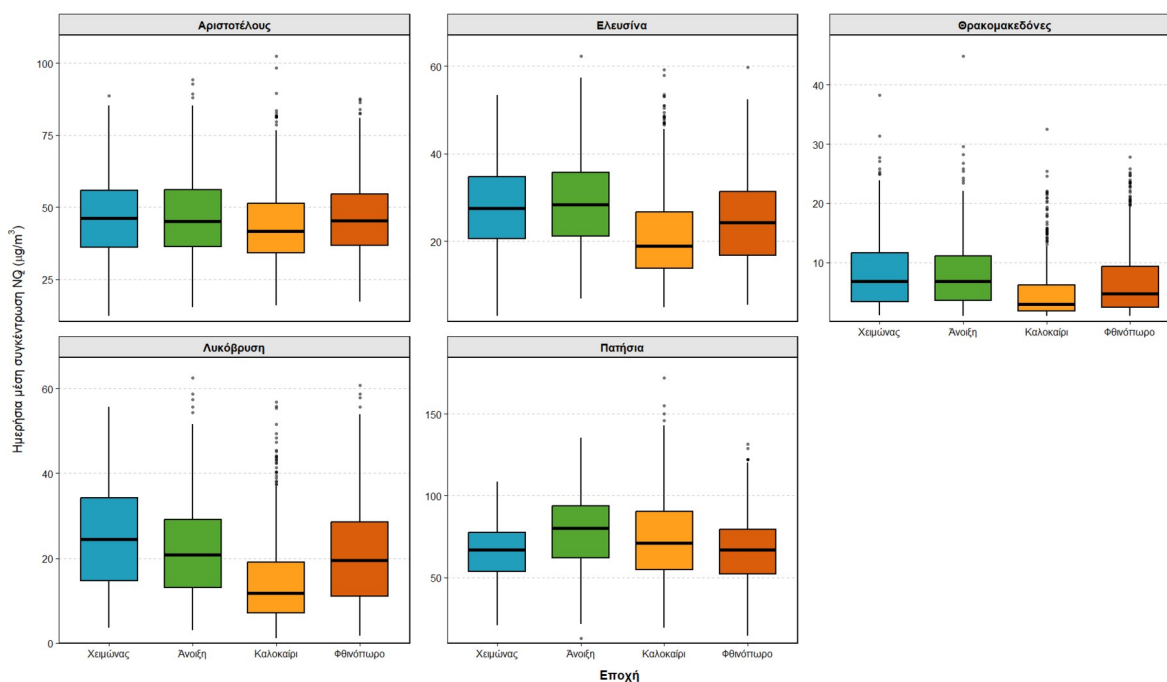
Σημείωση: Οι κατακόρυφες κλίμακες διαφοροποιούνται μεταξύ των επιμέρους διαγραμμάτων, ώστε να αποδίδεται ευκρινέστερα η εποχική κατανομή των συγκεντρώσεων σε κάθε σταθμό. Για τον λόγο αυτό, το οπτικό ύψος των πλαισίων και των απολήξεων δεν είναι άμεσα συγκρίσιμο μεταξύ διαφορετικών σταθμών.

Οι συγκεντρώσεις NO εμφάνισαν σαφή εποχική διαφοροποίηση στους περισσότερους σταθμούς. Οι υψηλότερες διάμεσες τιμές καταγράφηκαν γενικά τον χειμώνα, ενώ οι χαμηλότερες παρατηρήθηκαν το καλοκαίρι. Κατά το φθινόπωρο σημειώθηκε εκ νέου μετατόπιση των κατανομών προς υψηλότερες συγκεντρώσεις σε σχέση με τη θερινή περίοδο.

Η εποχική διαφοροποίηση ήταν ιδιαίτερα εμφανής στους σταθμούς Αριστοτέλους και Πατησίων, στους οποίους παρατηρήθηκε σαφής μείωση της διαμέσου από τον χειμώνα προς το καλοκαίρι. Στην Ελευσίνα και στη Λυκόβρυση οι συγκεντρώσεις κινήθηκαν σε χαμηλότερα επίπεδα, ενώ οι Θρακομακεδόνες παρουσίασαν σταθερά τις χαμηλότερες διάμεσες συγκεντρώσεις. Σε όλους τους σταθμούς παρατηρήθηκαν τιμές πέρα από τις απολήξεις, κυρίως προς το άνω τμήμα των κατανομών, στοιχείο που υποδηλώνει την

παρουσία περιορισμένου αριθμού ημερών με συγκεντρώσεις σημαντικά υψηλότερες από το κύριο σώμα των παρατηρήσεων.

Στη συνέχεια εξετάστηκε η εποχική κατανομή του NO₂ στους πέντε διαθέσιμους σταθμούς μέτρησης.



Σχήμα 4.9. Εποχική κατανομή της ημερήσιας μέσης συγκέντρωσης NO₂ στους σταθμούς Αριστοτέλους, Ελευσίνας, Θρακομακεδόνων, Λυκόβρυσης και Πατησίων κατά την περίοδο 2016–2024.

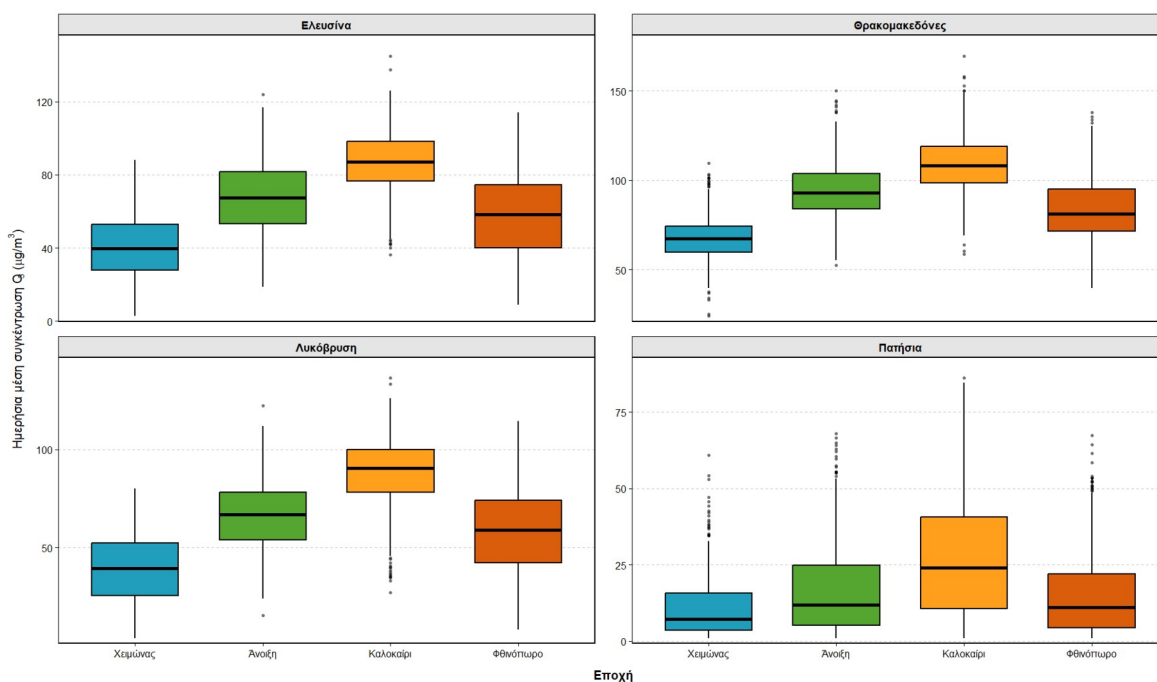
Σημείωση: Οι κατακόρυφες κλίμακες διαφοροποιούνται μεταξύ των επιμέρους διαγραμμάτων, ώστε να αποδίδεται ευκρινέστερα η εποχική κατανομή των συγκεντρώσεων σε κάθε σταθμό. Συνεπώς, οι διαφορές στη διασπορά μεταξύ σταθμών δεν μπορούν να αξιολογηθούν αποκλειστικά από το οπτικό ύψος των επιμέρους boxplots.

Οι συγκεντρώσεις NO₂ παρουσίασαν εποχικές διαφοροποιήσεις, χωρίς ωστόσο να ακολουθούν απολύτως ομοιόμορφο πρότυπο σε όλους τους σταθμούς. Στην Ελευσίνα, στους Θρακομακεδόνες και στη Λυκόβρυση οι χαμηλότερες διάμεσες τιμές καταγράφηκαν το καλοκαίρι, ενώ το φθινόπωρο παρατηρήθηκε εκ νέου αύξηση.

Στον σταθμό Αριστοτέλους οι διαφορές μεταξύ των εποχικών διαμέσων ήταν ηπιότερες, με ελαφρώς χαμηλότερες τιμές κατά τη θερινή περίοδο. Στον σταθμό Πατησίων, αντίθετα, η υψηλότερη διάμεση συγκέντρωση εμφανίστηκε την άνοιξη, ενώ οι υπόλοιπες εποχές

παρουσίασαν χαμηλότερα επίπεδα. Παρατηρήσεις πέρα από τις απολήξεις καταγράφηκαν σε όλους τους σταθμούς, κυρίως προς τις υψηλότερες συγκεντρώσεις, υποδηλώνοντας δεξιά επιμήκυνση ορισμένων εποχικών κατανομών.

Ακολούθησε η εξέταση της εποχικής κατανομής του O_3 στους σταθμούς Ελευσίνας, Θρακομακεδόνων, Λυκόβρυσης και Πατησίων.



Σχήμα 4.10. Εποχική κατανομή της ημερήσιας μέσης συγκέντρωσης O_3 στους σταθμούς Ελευσίνας, Θρακομακεδόνων, Λυκόβρυσης και Πατησίων κατά την περίοδο 2016–2024.

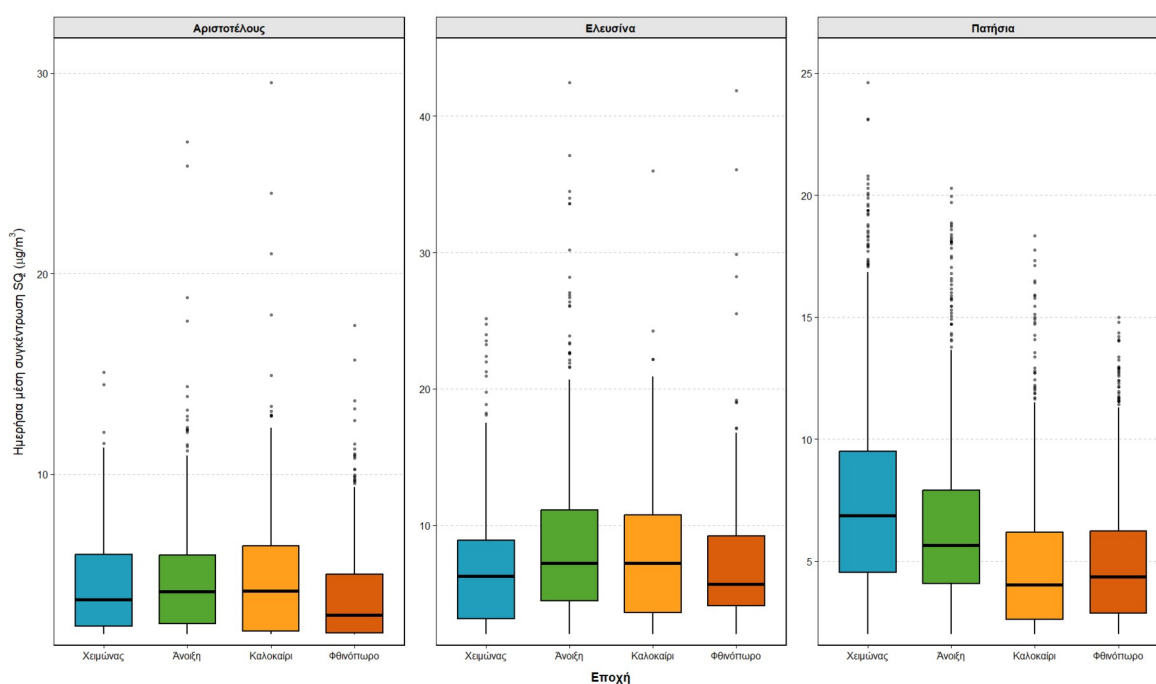
Σημείωση: Οι κατακόρυφες κλίμακες διαφοροποιούνται μεταξύ των επιμέρους διαγραμμάτων, ώστε να αποδίδεται ευκρινέστερα η εποχική κατανομή των συγκεντρώσεων σε κάθε σταθμό.

Σε αντίθεση με το NO και το NO_2 , το O_3 παρουσίασε σαφές θερινό εποχικό πρότυπο σε όλους τους διαθέσιμους σταθμούς. Οι χαμηλότερες διάμεσες συγκεντρώσεις καταγράφηκαν τον χειμώνα, ακολούθησε μετατόπιση προς υψηλότερες τιμές την άνοιξη και οι υψηλότερες διάμεσες συγκεντρώσεις εμφανίστηκαν το καλοκαίρι. Κατά το φθινόπωρο παρατηρήθηκε εκ νέου μείωση.

Οι Θρακομακεδόνες παρουσίασαν σταθερά τις υψηλότερες διάμεσες συγκεντρώσεις O_3 , ενώ ο σταθμός Πατησίων τις χαμηλότερες. Η Ελευσίνα και η Λυκόβρυση εμφάνισαν

παρόμοιο εποχικό πρότυπο, με σαφή μετατόπιση των κατανομών προς υψηλότερες συγκεντρώσεις κατά τη θερμή περίοδο. Οι εποχικές κατανομές περιλάμβαναν επίσης παρατηρήσεις πέρα από τις απολήξεις, κυρίως προς τις υψηλότερες συγκεντρώσεις.

Ακολούθησε η εξέταση της εποχικής κατανομής του SO_2 στους σταθμούς Αριστοτέλους, Ελευσίνας και Πατησίων. Η σύγκριση πραγματοποιήθηκε λαμβάνοντας υπόψη τόσο τις διαφορές μεταξύ των εποχών όσο και τη διαφορετική διαθεσιμότητα δεδομένων ανά σταθμό.



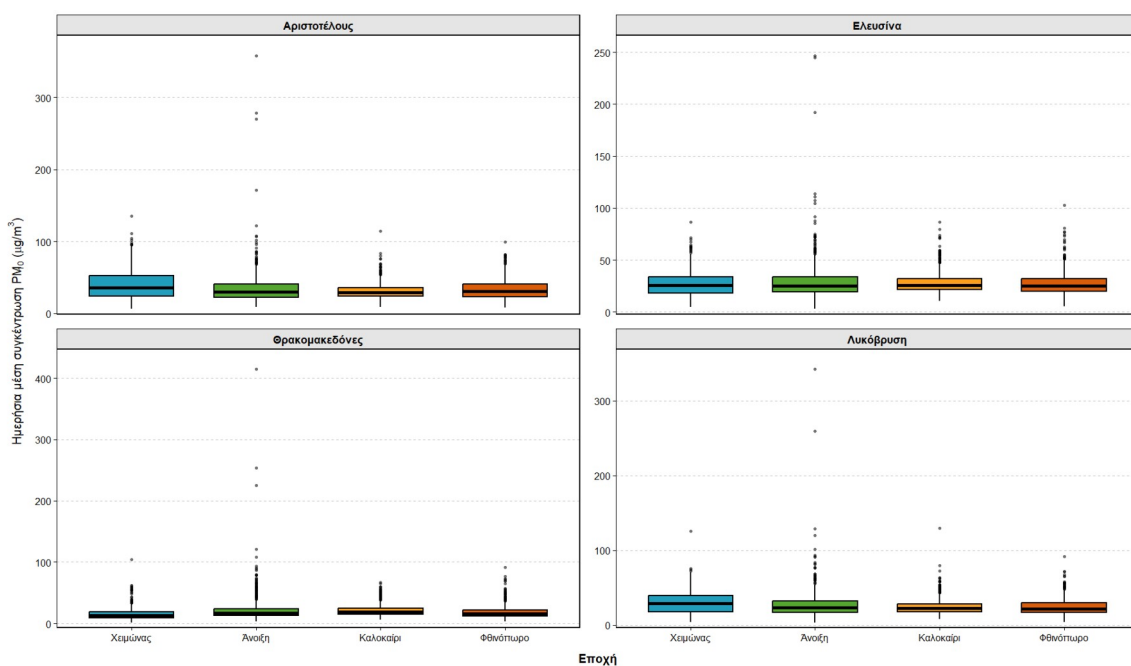
Σχήμα 4.11. Εποχική κατανομή της ημερήσιας μέσης συγκέντρωσης SO_2 στους σταθμούς Αριστοτέλους, Ελευσίνας και Πατησίων κατά την περίοδο 2016–2024.

Σημείωση: Οι κατακόρυφες κλίμακες διαφοροποιούνται μεταξύ των επιμέρους διαγραμμάτων, ώστε να αποδίδεται ευκρινέστερα η εποχική κατανομή των συγκεντρώσεων σε κάθε σταθμό.

Η εποχική κατανομή του SO_2 διαφοροποιήθηκε αισθητά μεταξύ των τριών σταθμών. Στον σταθμό Αριστοτέλους οι μεταβολές της διαμέσου ήταν σχετικά περιορισμένες, με χαμηλότερη τιμή το φθινόπωρο. Στην Ελευσίνα καταγράφηκαν υψηλότερες διάμεσες συγκεντρώσεις την άνοιξη και το καλοκαίρι, ενώ τον χειμώνα και το φθινόπωρο οι τιμές

ήταν χαμηλότερες. Στον σταθμό Πατησίων παρατηρήθηκε διαφορετικό πρότυπο, καθώς η υψηλότερη διάμεση συγκέντρωση εμφανίστηκε τον χειμώνα και η χαμηλότερη το καλοκαίρι. Και στους τρεις σταθμούς καταγράφηκαν παρατηρήσεις πέρα από τις απολήξεις, κυρίως προς το άνω μέρος των κατανομών. Η ερμηνεία των αποτελεσμάτων της Ελευσίνας πρέπει, ωστόσο, να γίνεται λαμβάνοντας υπόψη τη χαμηλότερη πληρότητα των διαθέσιμων δεδομένων SO₂ σε σύγκριση με τους άλλους σταθμούς.

Τέλος, εξετάστηκε η εποχική κατανομή των PM₁₀ στους σταθμούς Αριστοτέλους, Ελευσίνας, Θρακομακεδόνων και Λυκόβρυσης. Ιδιαίτερη έμφαση δόθηκε τόσο στις διαφορές μεταξύ των διαμέσων όσο και στην παρουσία υψηλών ημερήσιων συγκεντρώσεων.



Σχήμα 4.12. Εποχική κατανομή της ημερήσιας μέσης συγκέντρωσης PM₁₀ στους σταθμούς Αριστοτέλους, Ελευσίνας, Θρακομακεδόνων και Λυκόβρυσης κατά την περίοδο 2016–2024.

Σημείωση: Οι κατακόρυφες κλίμακες διαφοροποιούνται μεταξύ των επιμέρους διαγραμμάτων. Η παρουσία ιδιαίτερα υψηλών ημερήσιων τιμών πέρα από τις απολήξεις διευρύνει το εύρος των κατακόρυφων αξόνων και περιορίζει οπτικά το ύψος των πλαίσιων. Για τον λόγο αυτό, η διασπορά μεταξύ διαφορετικών σταθμών δεν πρέπει να συγκρίνεται αποκλειστικά βάσει της οπτικής τους εμφάνισης.

Η σύγκριση των τεσσάρων σταθμών ανέδειξε διαφοροποιημένη εποχική συμπεριφορά των PM_{10} . Στους σταθμούς Αριστοτέλους και Λυκόβρυσης οι υψηλότερες διάμεσες συγκεντρώσεις καταγράφηκαν τον χειμώνα, ενώ κατά τις υπόλοιπες εποχές οι τιμές ήταν χαμηλότερες.

Στην Ελευσίνα οι εποχικές διαφορές ήταν περιορισμένες, με ελαφρώς υψηλότερες διάμεσες τιμές την άνοιξη και το καλοκαίρι. Στους Θρακομακεδόνες οι συγκεντρώσεις αυξήθηκαν την άνοιξη και παρέμειναν σχετικά υψηλές το καλοκαίρι, πριν μειωθούν το φθινόπωρο. Σε όλους τους σταθμούς παρατηρήθηκαν πολυάριθμες τιμές πέρα από τις απολήξεις, με ορισμένες από αυτές να απέχουν σημαντικά από το κύριο σώμα των κατανομών.

Συνολικά, η εποχική συμπεριφορά των ατμοσφαιρικών ρύπων διαφοροποιήθηκε αισθητά ανάλογα με τον εξεταζόμενο ρύπο και τον σταθμό μέτρησης. Το NO παρουσίασε γενικά υψηλότερες διάμεσες συγκεντρώσεις τον χειμώνα και χαμηλότερες το καλοκαίρι, ενώ το NO_2 εμφάνισε ηπιότερες και λιγότερο ομοιόμορφες εποχικές μεταβολές. Αντίθετα, το O_3 ακολούθησε σαφές θερινό πρότυπο, με τις υψηλότερες διάμεσες συγκεντρώσεις να καταγράφονται το καλοκαίρι. Για το SO_2 και τα PM_{10} δεν παρατηρήθηκε ενιαίο εποχικό πρότυπο σε όλους τους διαθέσιμους σταθμούς.

Οι παραπάνω διαφοροποιήσεις αποτελούν περιγραφικά ευρήματα και δεν τεκμηριώνουν από μόνες τους στατιστικά σημαντικές διαφορές μεταξύ των εποχών. Επιπλέον, λόγω της χρήσης διαφορετικών κατακόρυφων κλιμάκων, οι συγκρίσεις της διασποράς μεταξύ σταθμών πρέπει να βασίζονται σε αριθμητικά μέτρα και όχι αποκλειστικά στην οπτική έκταση των πλαισίων και των απολήξεων.

4.5 Σχέση θερμοκρασίας και μονοξειδίου του αζώτου (NO)

Η σχέση μεταξύ της θερμοκρασίας και της συγκέντρωσης μονοξειδίου του αζώτου (NO) διερευνήθηκε μέσω δύο συμπληρωματικών αναλυτικών προσεγγίσεων. Αρχικά εξετάστηκε η σχέση μεταξύ της ημερήσιας μέσης θερμοκρασίας και της αντίστοιχης ημερήσιας μέσης συγκέντρωσης NO . Στη συνέχεια διερευνήθηκε η σχέση μεταξύ των ημερήσιων μεταβολών των δύο μεγεθών, με σκοπό την αποτύπωση της βραχυχρόνιας συνδιακύμανσής τους.

Οι ημερήσιες μεταβολές υπολογίστηκαν ως η διαφορά μεταξύ της τιμής κάθε ημέρας και της αντίστοιχης τιμής της αμέσως προηγούμενης ημερολογιακής ημέρας. Θετική μεταβολή δηλώνει αύξηση της εξεταζόμενης μεταβλητής σε σχέση με την προηγούμενη ημέρα, αρνητική μεταβολή δηλώνει μείωση, ενώ μηδενική τιμή δηλώνει απουσία μεταβολής.

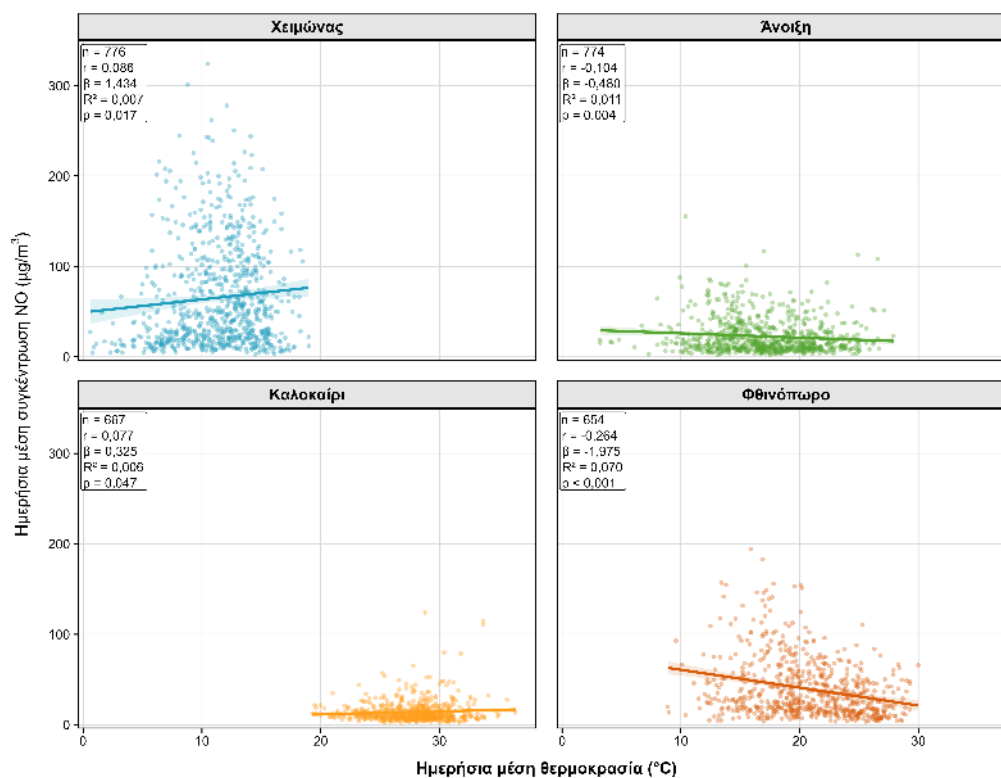
Οι αναλύσεις πραγματοποιήθηκαν χωριστά ανά εποχή και σταθμό μέτρησης και βασίστηκαν αποκλειστικά σε ημέρες με ταυτόχρονα έγκυρες τιμές θερμοκρασίας και NO. Για την ανάλυση των ημερήσιων μεταβολών χρησιμοποιήθηκαν μόνο ζεύγη παρατηρήσεων που αντιστοιχούσαν σε πραγματικά διαδοχικές ημερομηνίες, ώστε να αποκλείονται ψευδομεταβολές που θα μπορούσαν να προκύψουν από χρονικά κενά στις χρονοσειρές.

4.5.1 Σχέση ημερήσιας μέσης θερμοκρασίας και ημερήσιας συγκέντρωσης NO ανά εποχή και σταθμό

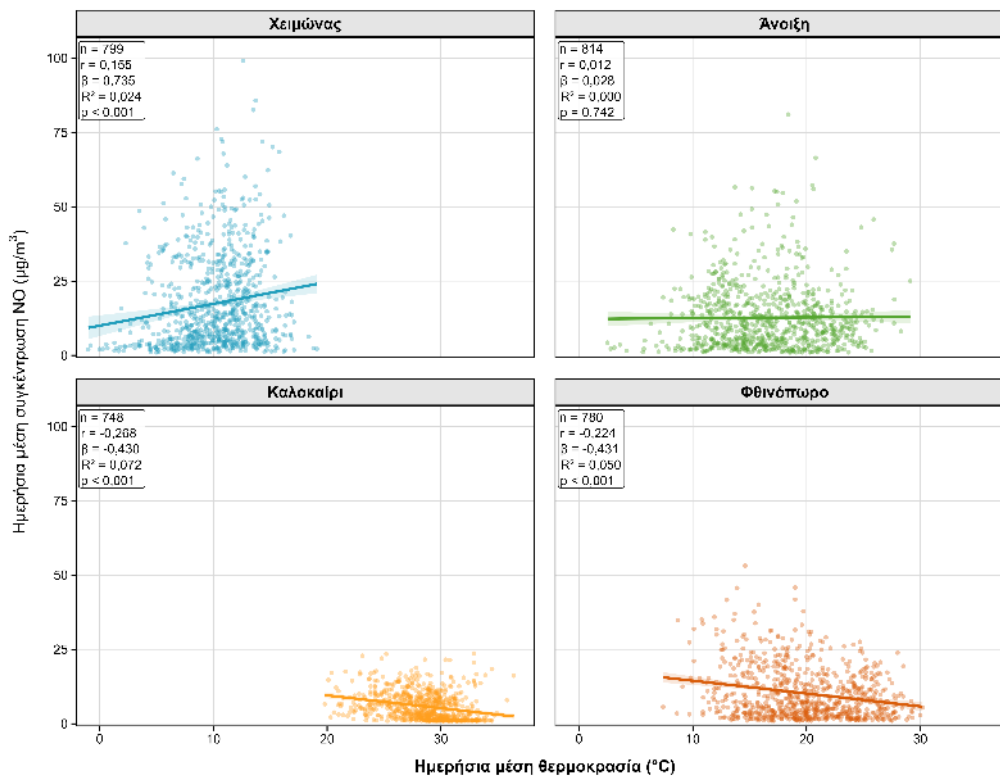
Η σχέση μεταξύ της ημερήσιας μέσης θερμοκρασίας και της ημερήσιας μέσης συγκέντρωσης NO εξετάστηκε χωριστά για κάθε εποχή και σταθμό μέτρησης, με βάση τις ημέρες για τις οποίες υπήρχαν ταυτόχρονα έγκυρες παρατηρήσεις και για τις δύο μεταβλητές. Για κάθε συνδυασμό εποχής και σταθμού εφαρμόστηκε απλό γραμμικό μοντέλο παλινδρόμησης, προκειμένου να εκτιμηθούν η κατεύθυνση και το μέγεθος της γραμμικής σχέσης.

Για κάθε επιμέρους ανάλυση υπολογίστηκαν ο αριθμός των κοινών έγκυρων παρατηρήσεων, ο συντελεστής γραμμικής συσχέτισης Pearson r , η κλίση της γραμμικής παλινδρόμησης β , η τιμή στατιστικής σημαντικότητας p και ο συντελεστής προσδιορισμού R^2 . Ο συντελεστής Pearson αποτυπώνει την κατεύθυνση και την ισχύ της γραμμικής συσχέτισης, ενώ η κλίση β εκφράζει την εκτιμώμενη μεταβολή της ημερήσιας συγκέντρωσης NO, σε $\mu\text{g}/\text{m}^3$, η οποία αντιστοιχεί σε αύξηση της θερμοκρασίας κατά 1°C . Ο συντελεστής R^2 αποτυπώνει το ποσοστό της παρατηρούμενης μεταβλητότητας των συγκεντρώσεων NO που αντιστοιχεί στη γραμμική σχέση με τη θερμοκρασία στο πλαίσιο του συγκεκριμένου μοντέλου.

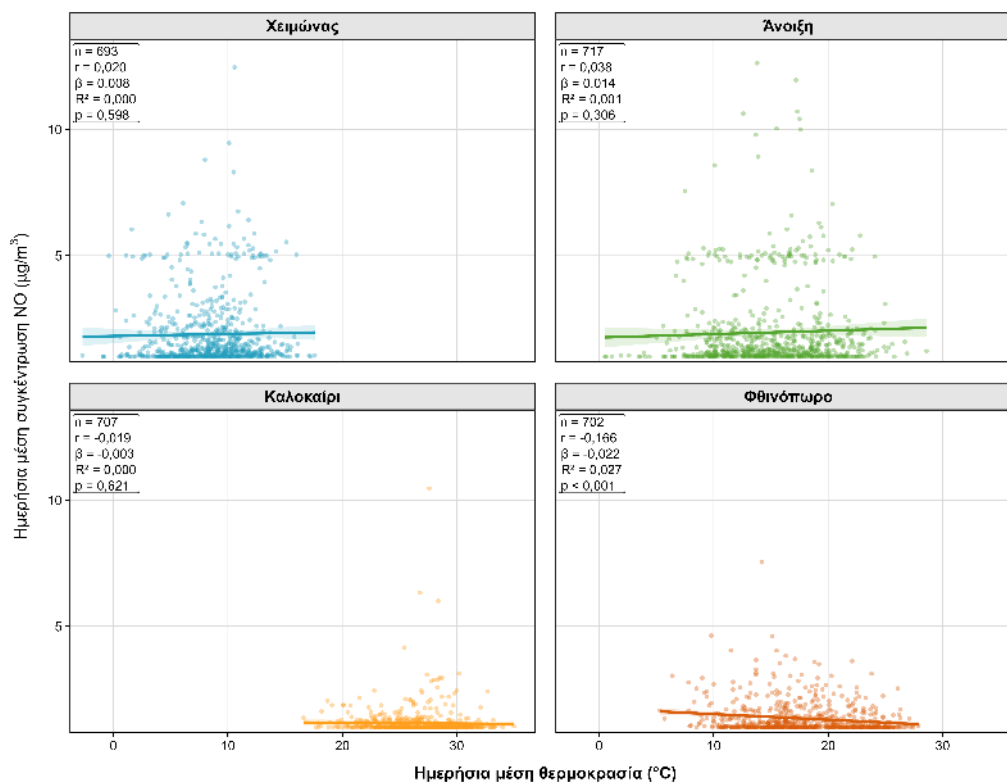
Στα διαγράμματα παρουσιάζονται τα επιμέρους ζεύγη παρατηρήσεων, η προσαρμοσμένη γραμμή γραμμικής παλινδρόμησης, το αντίστοιχο διάστημα εμπιστοσύνης 95% και τα βασικά στατιστικά αποτελέσματα κάθε ανάλυσης.



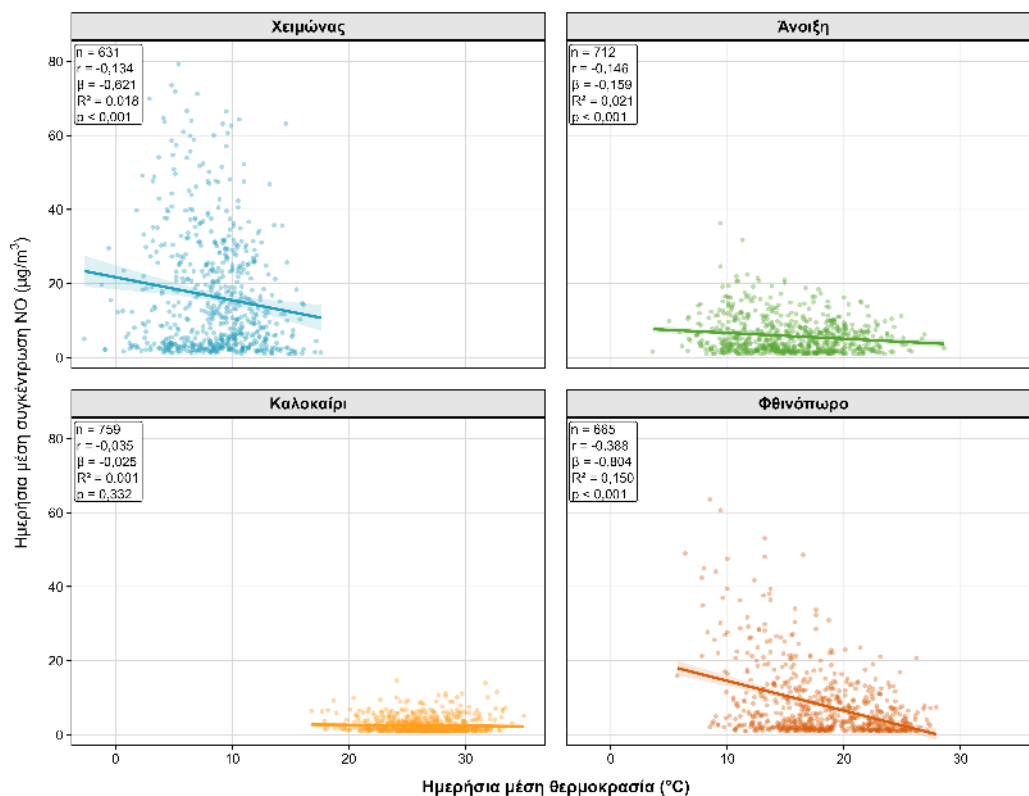
Σχήμα 4.13. Σχέση μεταξύ της ημερήσιας μέσης θερμοκρασίας και της ημερήσιας μέσης συγκέντρωσης NO ανά εποχή στον **σταθμό Αριστοτέλους** κατά την περίοδο 2016–2024.



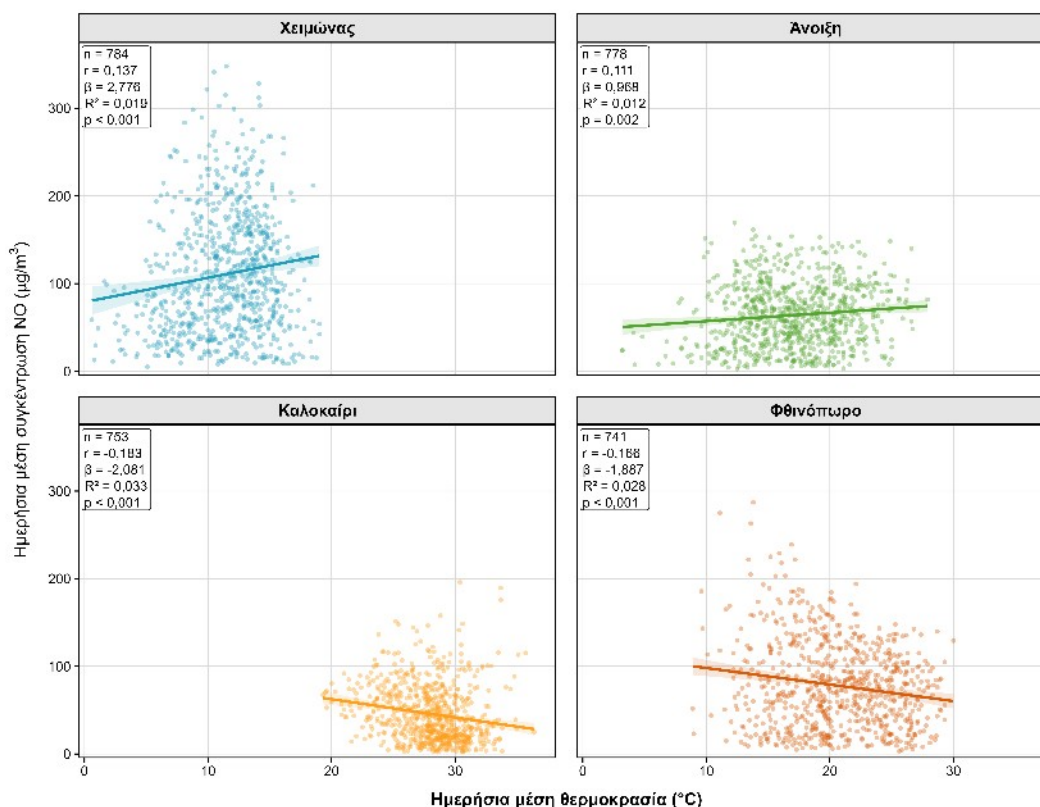
Σχήμα 4.14. Σχέση μεταξύ της ημερήσιας μέσης θερμοκρασίας και της ημερήσιας μέσης συγκέντρωσης NO ανά εποχή στον **σταθμό Ελευσίνας** κατά την περίοδο 2016–2024.



Σχήμα 4.15. Σχέση μεταξύ της ημερήσιας μέσης θερμοκρασίας και της ημερήσιας μέσης συγκέντρωσης NO ανά εποχή στον **σταθμό Θρακομακεδόνων** κατά την περίοδο 2016–2024.



Σχήμα 4.16. Σχέση μεταξύ της ημερήσιας μέσης θερμοκρασίας και της ημερήσιας μέσης συγκέντρωσης NO ανά εποχή στον **σταθμό Λυκόβρυσης** κατά την περίοδο 2016–2024.



Σχήμα 4.17. Σχέση μεταξύ της ημερήσιας μέσης θερμοκρασίας και της ημερήσιας μέσης συγκέντρωσης NO ανά εποχή στον **σταθμό Πατησίων** κατά την περίοδο 2016–2024.

Η σχέση μεταξύ της ημερήσιας μέσης θερμοκρασίας και της ημερήσιας συγκέντρωσης NO διαφοροποιήθηκε τόσο μεταξύ των εποχών όσο και μεταξύ των σταθμών μέτρησης. Στην πλειονότητα των επιμέρους αναλύσεων οι γραμμικές συσχετίσεις ήταν πολύ ασθενείς ή ασθενείς, ενώ διαφοροποιήθηκαν και ως προς την κατεύθυνσή τους.

Η ισχυρότερη αρνητική συσχέτιση μεταξύ των εξεταζόμενων συνδυασμών καταγράφηκε στον σταθμό Λυκόβρυσης κατά το φθινόπωρο, με $r = -0,388$, $\beta = -0,804 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ανά $^{\circ}\text{C}$, $R^2=0,150$ και $p<0,001$. Επομένως, στο πλαίσιο του γραμμικού μοντέλου, αύξηση της ημερήσιας μέσης θερμοκρασίας κατά 1°C αντιστοιχούσε σε εκτιμώμενη μείωση της συγκέντρωσης NO κατά $0,804 \mu\text{g}/\text{m}^3$. Παρά τη συγκριτικά ισχυρότερη σχέση, το μοντέλο απέδωσε μόνο το 15,0% της παρατηρούμενης μεταβλητότητας των συγκεντρώσεων NO. Ασθενείς αρνητικές συσχετίσεις καταγράφηκαν επίσης στην Ελευσίνα κατά το καλοκαίρι ($r=-0,268$, $\beta=-0,430$, $R^2=0,072$, $p<0,001$) και το φθινόπωρο ($r=-0,224$, $\beta=-0,431$,

$R^2=0,050$, $p<0,001$), στον σταθμό Αριστοτέλους κατά το φθινόπωρο ($r=-0,264$, $\beta=-1,975$, $R^2=0,070$, $p<0,001$) και στον σταθμό Πατησίων κατά το καλοκαίρι ($r=-0,183$, $\beta=-2,081$, $R^2=0,033$, $p<0,001$). Οι διαφοροποιήσεις στις τιμές της κλίσης μεταξύ των σταθμών πρέπει να ερμηνεύονται σε συνδυασμό με τα διαφορετικά επίπεδα και εύρη συγκεντρώσεων ΝΟ. Ασθενείς θετικές συσχετίσεις παρατηρήθηκαν κυρίως κατά τον χειμώνα στην Ελευσίνα ($r=0,155$, $\beta=0,735$, $R^2=0,024$, $p<0,001$) και στον σταθμό Πατησίων ($r=0,137$, $\beta=2,776$, $R^2=0,019$, $p<0,001$), καθώς και κατά την άνοιξη στον σταθμό Πατησίων ($r=0,111$, $\beta=0,968$, $R^2=0,012$, $p=0,002$). Παρά τη στατιστική σημαντικότητα, οι πολύ χαμηλές τιμές του R^2 υποδηλώνουν περιορισμένη πρακτική ή ερμηνευτική ισχύ των συγκεκριμένων γραμμικών σχέσεων.

Στον σταθμό Θρακομακεδόνων δεν διαπιστώθηκε ουσιαστική γραμμική συσχέτιση κατά τον χειμώνα ($r=0,020$, $p=0,598$), την άνοιξη ($r=0,038$, $p=0,306$) και το καλοκαίρι ($r=-0,019$, $p=0,621$). Μόνο κατά το φθινόπωρο καταγράφηκε ασθενής αρνητική συσχέτιση ($r=-0,166$, $\beta=-0,022$, $R^2=0,027$, $p<0,001$), η οποία όμως απέδωσε πολύ μικρό ποσοστό της μεταβλητότητας των συγκεντρώσεων.

Συνολικά, παρότι αρκετές από τις εκτιμώμενες σχέσεις ήταν στατιστικά σημαντικές, οι περισσότερες τιμές του R^2 παρέμειναν χαμηλές. Το εύρημα αυτό δείχνει ότι η ημερήσια μέση θερμοκρασία, όταν εξετάζεται ως μοναδική ανεξάρτητη μεταβλητή, αποδίδει περιορισμένο μέρος της ημερήσιας μεταβλητότητας των συγκεντρώσεων ΝΟ. Η στατιστική σημαντικότητα ορισμένων ασθενών σχέσεων πρέπει, επομένως, να αξιολογείται σε συνδυασμό με το μεγάλο μέγεθος των επιμέρους δειγμάτων και όχι ανεξάρτητα από το μέγεθος της επίδρασης.

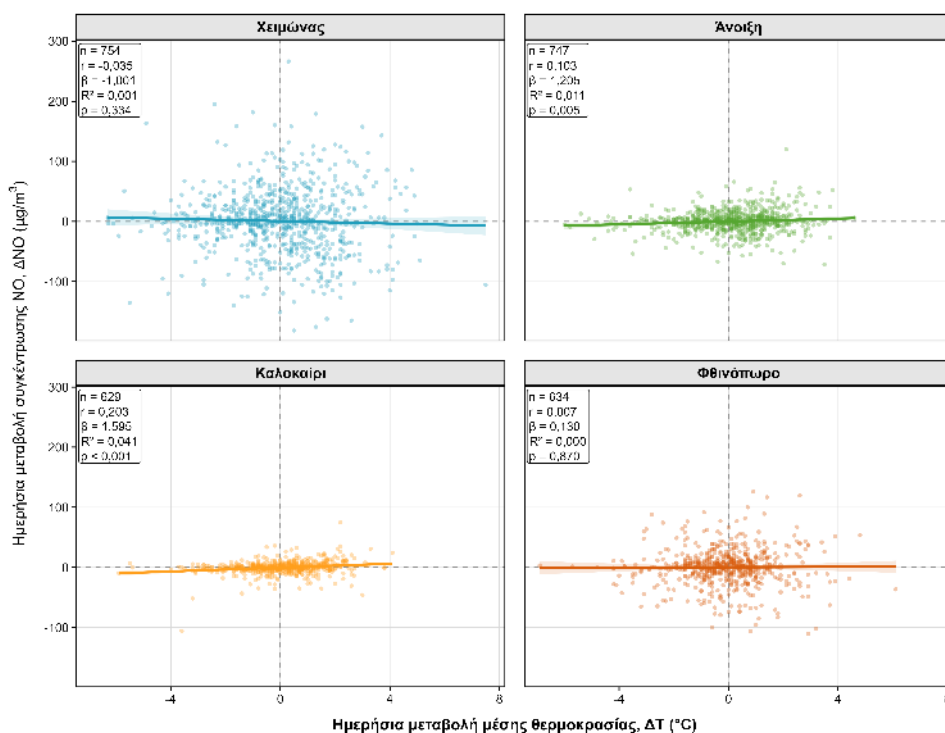
Η σχέση θερμοκρασίας-ΝΟ δεν παρουσίασε ενιαίο εποχικό ή χωρικό πρότυπο. Οι διαφοροποιήσεις που καταγράφηκαν ενδέχεται να συνδέονται και με άλλους παράγοντες, όπως η ένταση και η χρονική κατανομή των εκπομπών, οι κυκλοφοριακές συνθήκες, η ταχύτητα και η διεύθυνση του ανέμου, το ύψος ανάμιξης και η ατμοσφαιρική ευστάθεια. Ωστόσο, επειδή οι παράγοντες αυτοί δεν ενσωματώθηκαν στα συγκεκριμένα διμεταβλητά μοντέλα, δεν είναι δυνατόν να προσδιοριστεί η επιμέρους συμβολή τους από την παρούσα ανάλυση.

4.5.2 Σχέση ημερήσιας μεταβολής της θερμοκρασίας και ημερήσιας μεταβολής της συγκέντρωσης NO ανά εποχή και σταθμό

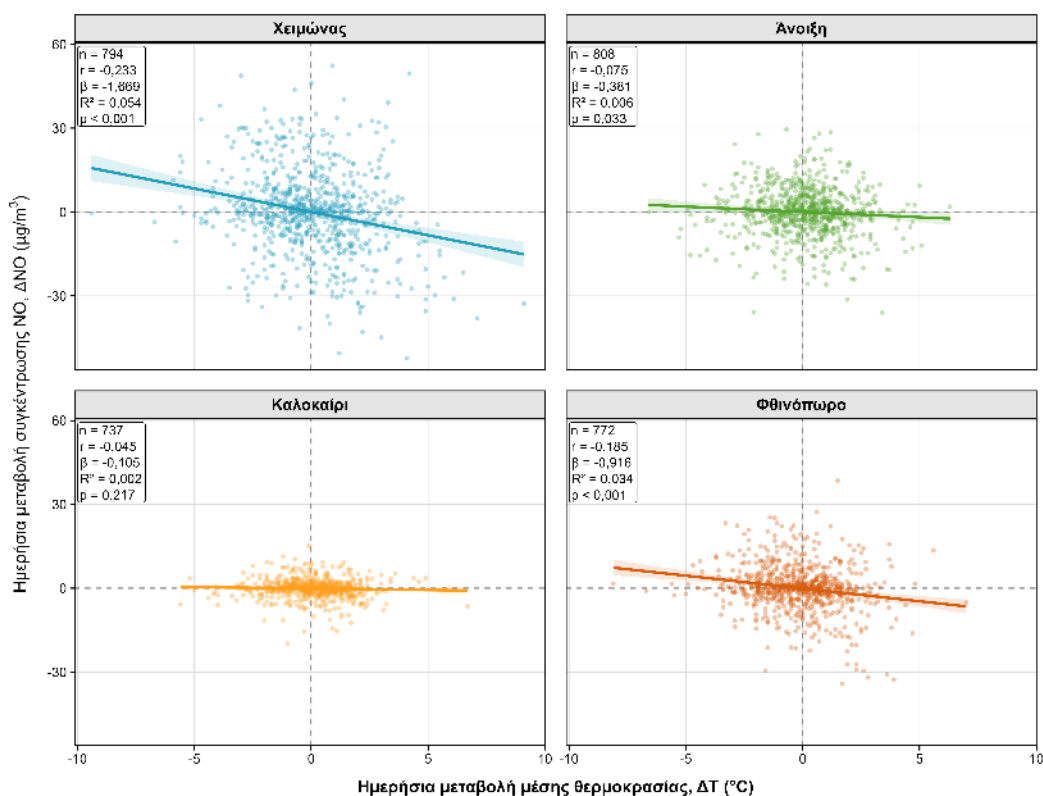
Για τη διερεύνηση της βραχυχρόνιας συνδιακύμανσης της θερμοκρασίας και της συγκέντρωσης NO υπολογίστηκαν οι ημερήσιες μεταβολές των δύο μεταβλητών ως η διαφορά μεταξύ της τιμής κάθε ημέρας και της τιμής της αμέσως προηγούμενης ημερολογιακής ημέρας. Στην ανάλυση συμπεριλήφθηκαν μόνο ζεύγη πραγματικά διαδοχικών ημερών με έγκυρες παρατηρήσεις και για τις δύο μεταβλητές, ώστε να αποκλειστούν μεταβολές που θα μπορούσαν να οφείλονται σε χρονικά κενά των χρονοσειρών.

Η σχέση μεταξύ της ημερήσιας μεταβολής της μέσης θερμοκρασίας, ΔT , και της ημερήσιας μεταβολής της συγκέντρωσης NO, ΔNO , εξετάστηκε χωριστά ανά εποχή και σταθμό μέτρησης μέσω απλής γραμμικής παλινδρόμησης. Για κάθε συνδυασμό υπολογίστηκαν ο αριθμός των έγκυρων ζευγών παρατηρήσεων, ο συντελεστής γραμμικής συσχέτισης Pearson r , η μη τυποποιημένη κλίση β , η τιμή στατιστικής σημαντικότητας p και ο συντελεστής προσδιορισμού R^2 . Η κλίση β εκφράζει την εκτιμώμενη μεταβολή του ΔNO , σε $\mu g/m^3$, που αντιστοιχεί σε αύξηση του ΔT κατά $1^\circ C$.

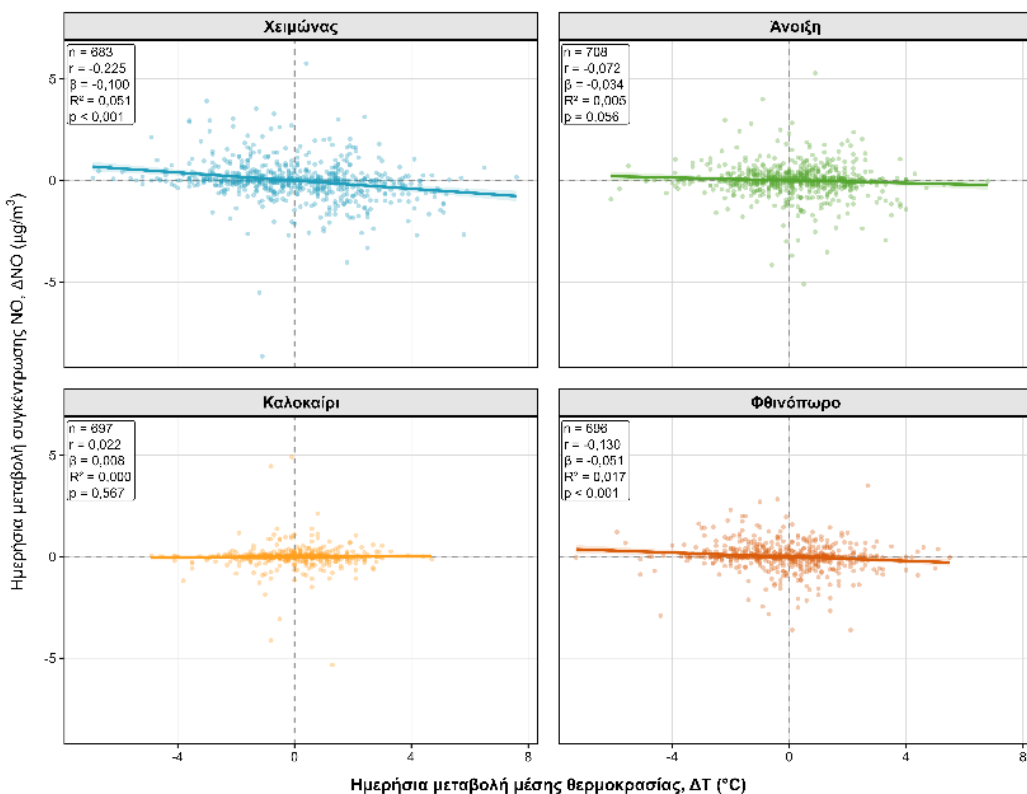
Τα αντίστοιχα διαγράμματα διασποράς παρουσιάζονται στα Σχήματα 4.18–4.22.



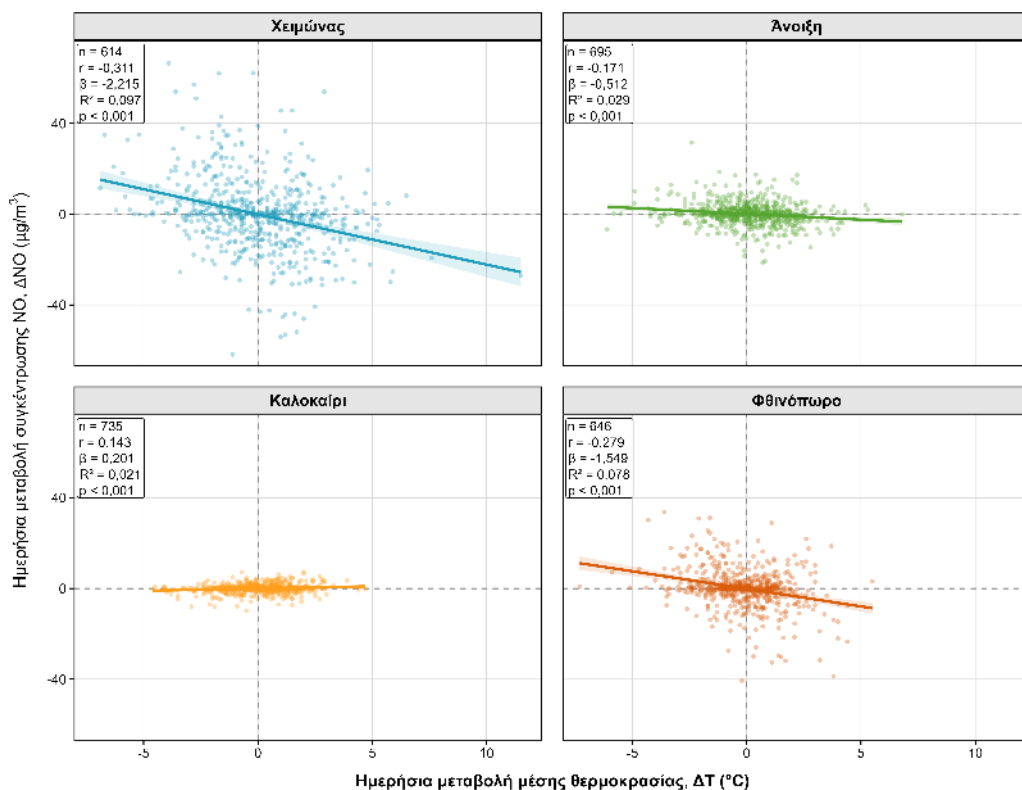
Σχήμα 4.18. Σχέση μεταξύ της ημερήσιας μεταβολής της μέσης θερμοκρασίας και της ημερήσιας μεταβολής της συγκέντρωσης NO ανά εποχή στον **σταθμό Αριστοτέλους** κατά την περίοδο 2016–2024.



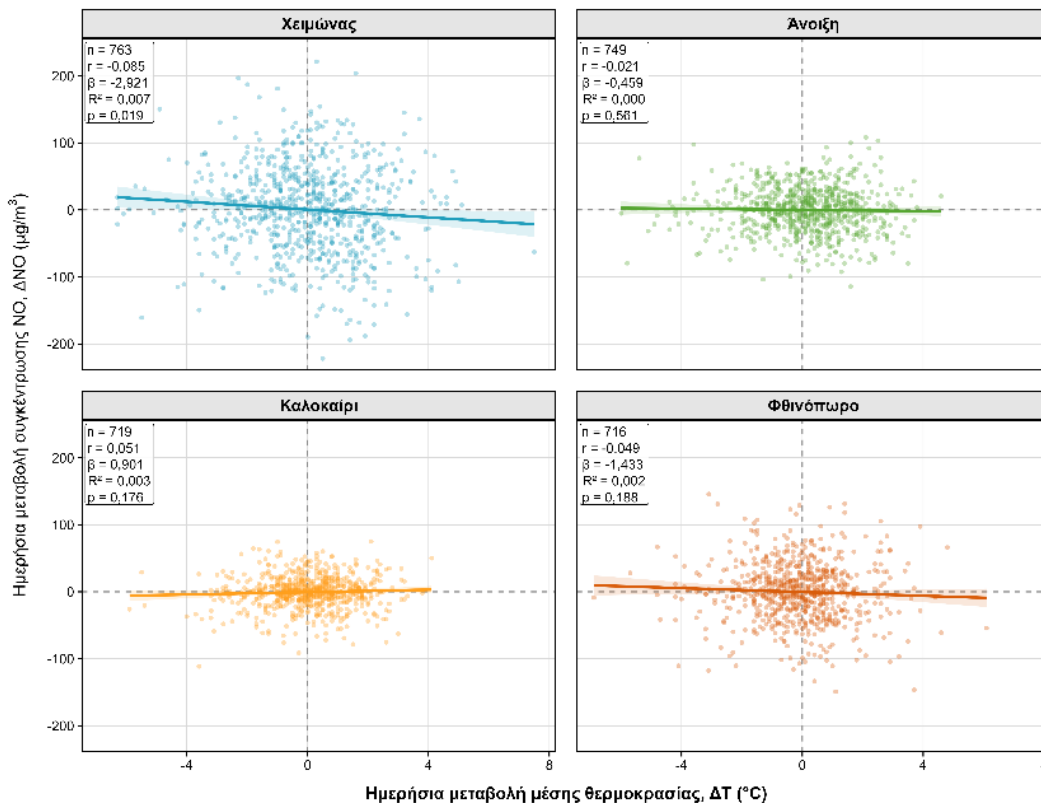
Σχήμα 4.19. Σχέση μεταξύ της ημερήσιας μεταβολής της μέσης θερμοκρασίας και της ημερήσιας μεταβολής της συγκέντρωσης NO ανά εποχή στον **σταθμό Ελευσίνας** κατά την περίοδο 2016–2024.



Σχήμα 4.20. Σχέση μεταξύ της ημερήσιας μεταβολής της μέσης θερμοκρασίας και της ημερήσιας μεταβολής της συγκέντρωσης NO ανά εποχή στον **σταθμό Θρακομακεδόνων** κατά την περίοδο 2016–2024.



Σχήμα 4.21. Σχέση μεταξύ της ημερήσιας μεταβολής της μέσης θερμοκρασίας και της ημερήσιας μεταβολής της συγκέντρωσης NO ανά εποχή στον **σταθμό Λυκόβρυσης** κατά την περίοδο 2016–2024.



Σχήμα 4.22. Σχέση μεταξύ της ημερήσιας μεταβολής της μέσης θερμοκρασίας και της ημερήσιας μεταβολής της συγκέντρωσης NO ανά εποχή στον σταθμό **Πατησίων** κατά την περίοδο 2016–2024.

Οι επιμέρους αναλύσεις της σχέσης μεταξύ ΔT και ΔNO ανέδειξαν διαφορετική συμπεριφορά μεταξύ εποχών και σταθμών, χωρίς να προκύπτει ένα κοινό χωρικό ή εποχικό πρότυπο. Οι περισσότερες συσχετίσεις ήταν πολύ ασθενείς ή ασθενείς και παρουσίασαν διαφοροποιήσεις ως προς την κατεύθυνσή τους.

Οι ισχυρότερες αρνητικές συσχετίσεις μεταξύ των εξεταζόμενων συνδυασμών καταγράφηκαν στον σταθμό Λυκόβρυσης κατά τον χειμώνα, με $r=-0,311$, $\beta=-2,215 \mu g/m^3$ ανά $^{\circ}C$, $R^2=0,097$ και $p<0,001$, και κατά το φθινόπωρο, με $r=-0,279$, $\beta=-1,549 \mu g/m^3$ ανά $^{\circ}C$, $R^2=0,078$ και $p<0,001$. Στο πλαίσιο των αντίστοιχων γραμμικών μοντέλων, θετικότερη ημερήσια μεταβολή της θερμοκρασίας συνδεόταν με αρνητικότερη ημερήσια μεταβολή της συγκέντρωσης NO . Ωστόσο, τα μοντέλα απέδωσαν μόνο το 9,7% και το 7,8% της παρατηρούμενης μεταβλητότητας του ΔNO , αντίστοιχα.

Αρνητικές συσχετίσεις καταγράφηκαν επίσης στην Ελευσίνα κατά τον χειμώνα ($r=-0,233$, $\beta=-1,669$, $R^2=0,054$, $p<0,001$) και το φθινόπωρο ($r=-0,185$, $\beta=-0,916$, $R^2=0,034$, $p<0,001$), καθώς και στους Θρακομακεδόνες κατά τον χειμώνα ($r=-0,225$, $\beta=-0,100$, $R^2=0,051$, $p<0,001$) και το φθινόπωρο ($r=-0,130$, $\beta=-0,051$, $R^2=0,017$, $p<0,001$). Οι χαμηλές τιμές του R^2 δείχνουν ότι, παρά τη στατιστική σημαντικότητα, η γραμμική σχέση παρέμενε περιορισμένη.

Στον σταθμό Αριστοτέλους καταγράφηκε ασθενής θετική συσχέτιση κατά το καλοκαίρι ($r=0,203$, $\beta=1,595$, $R^2=0,041$, $p<0,001$) και πολύ ασθενής θετική συσχέτιση κατά την άνοιξη ($r=0,103$, $\beta=1,205$, $R^2=0,011$, $p=0,005$). Αντίθετα, κατά τον χειμώνα ($r=-0,035$, $p=0,341$) και το φθινόπωρο ($r=0,007$, $p=0,870$) δεν διαπιστώθηκε στατιστικά σημαντική γραμμική σχέση. Στον σταθμό Λυκόβρυσης καταγράφηκε επίσης ασθενής θετική συσχέτιση κατά το καλοκαίρι ($r=0,143$, $\beta=0,201$, $R^2=0,021$, $p<0,001$).

Στον σταθμό Πατησίων οι συσχετίσεις ήταν πολύ ασθενείς ή σχεδόν μηδενικές σε όλες τις εποχές. Μόνο κατά τον χειμώνα καταγράφηκε πολύ ασθενής αρνητική και στατιστικά σημαντική συσχέτιση ($r=-0,085$, $\beta=-2,921$, $R^2=0,007$, $p=0,019$). Κατά την άνοιξη ($r=-0,021$, $p=0,561$), το καλοκαίρι ($r=0,051$, $p=0,176$) και το φθινόπωρο ($r=-0,049$, $p=0,188$) δεν προέκυψαν στατιστικά σημαντικές γραμμικές σχέσεις.

Συνολικά, παρότι ορισμένες από τις εκτιμώμενες σχέσεις ήταν στατιστικά σημαντικές, οι τιμές του R^2 παρέμειναν χαμηλές σε όλους τους συνδυασμούς εποχής και σταθμού. Η υψηλότερη τιμή καταγράφηκε στη Λυκόβρυση κατά τον χειμώνα και ήταν ίση με 0,097, γεγονός που σημαίνει ότι το γραμμικό μοντέλο με ανεξάρτητη μεταβλητή το ΔT απέδωσε το 9,7% της παρατηρούμενης μεταβλητότητας του ΔNO . Επομένως, η ημερήσια μεταβολή

της θερμοκρασίας δεν αποτέλεσε ισχυρό μεμονωμένο γραμμικό προσδιοριστικό παράγοντα της ημερήσιας μεταβολής της συγκέντρωσης NO.

Η στατιστική σημαντικότητα ορισμένων πολύ ασθενών συσχετίσεων πρέπει να αξιολογείται σε συνδυασμό με το μεγάλο μέγεθος των επιμέρους δειγμάτων. Συνεπώς, η βραχυχρόνια συνδιακύμανση των δύο μεταβλητών ήταν γενικά περιορισμένη και διαφοροποιήθηκε ανάλογα με την εποχή και τον σταθμό μέτρησης, χωρίς τα αποτελέσματα να τεκμηριώνουν αιτιώδη επίδραση της μεταβολής της θερμοκρασίας στη μεταβολή της συγκέντρωσης NO.

4.5.3 Κατανομή της ημερήσιας μεταβολής της συγκέντρωσης NO ανά κατηγορία ημερήσιας μεταβολής της θερμοκρασίας

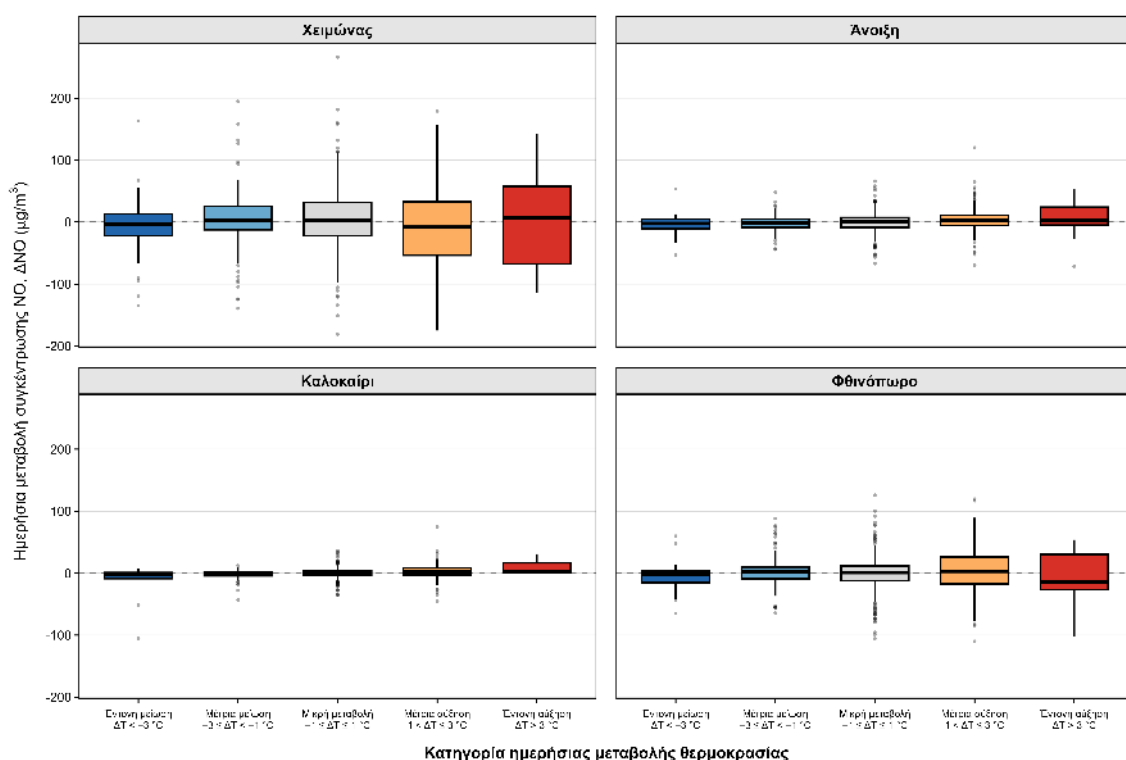
Για την πληρέστερη διερεύνηση της σχέσης μεταξύ των ημερήσιων μεταβολών, η ημερήσια μεταβολή της μέσης θερμοκρασίας ταξινομήθηκε σε επιμέρους κατηγορίες. Για κάθε κατηγορία εξετάστηκε η κατανομή της αντίστοιχης ημερήσιας μεταβολής της συγκέντρωσης NO μέσω διαγραμμάτων πλαισίου και απολήξεων. Η ανάλυση πραγματοποιήθηκε χωριστά ανά εποχή και σταθμό μέτρησης και βασίστηκε αποκλειστικά σε ζεύγη πραγματικά διαδοχικών ημερών με έγκυρες τιμές και για τις δύο μεταβλητές.

Η κατηγοριοποίηση της ΔT χρησιμοποιήθηκε συμπληρωματικά προς την προηγούμενη ανάλυση γραμμικής παλινδρόμησης, ώστε να εξεταστεί εάν το πρόσημο και το μέγεθος της ημερήσιας θερμοκρασιακής μεταβολής συνδέονται με συστηματικές μετατοπίσεις της κατανομής της ΔNO . Με τον τρόπο αυτό καθίσταται δυνατή η περιγραφική σύγκριση όχι μόνο της κεντρικής τάσης, αλλά και της μεταβλητότητας και της παρουσίας ακραίων ημερήσιων μεταβολών μεταξύ των επιμέρους κατηγοριών.

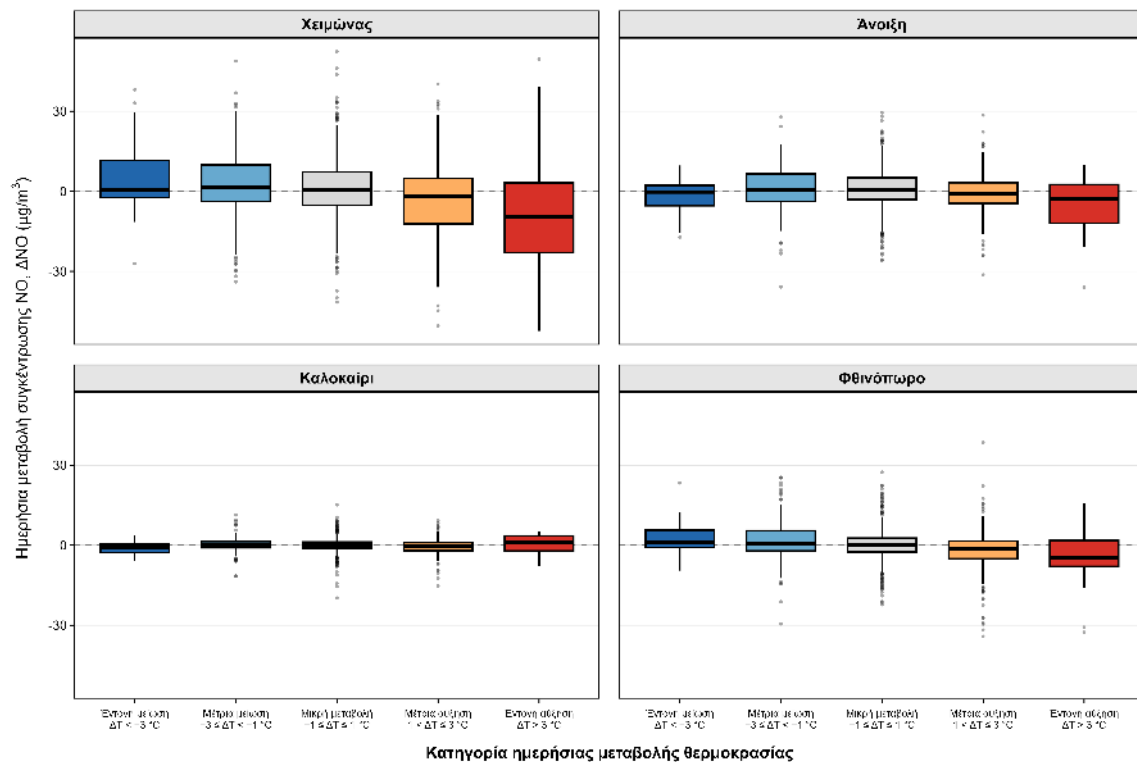
Οι κατηγορίες της ημερήσιας μεταβολής της θερμοκρασίας ορίστηκαν ως εξής:

- έντονη μείωση: $\Delta T < -3 \text{ }^{\circ}\text{C}$,
- μέτρια μείωση: $-3 \text{ }^{\circ}\text{C} \leq \Delta T < -1 \text{ }^{\circ}\text{C}$,
- μικρή μεταβολή: $-1 \text{ }^{\circ}\text{C} \leq \Delta T < 1 \text{ }^{\circ}\text{C}$,
- μέτρια αύξηση: $1 \text{ }^{\circ}\text{C} \leq \Delta T < 3 \text{ }^{\circ}\text{C}$,
- έντονη αύξηση: $\Delta T \geq 3 \text{ }^{\circ}\text{C}$.

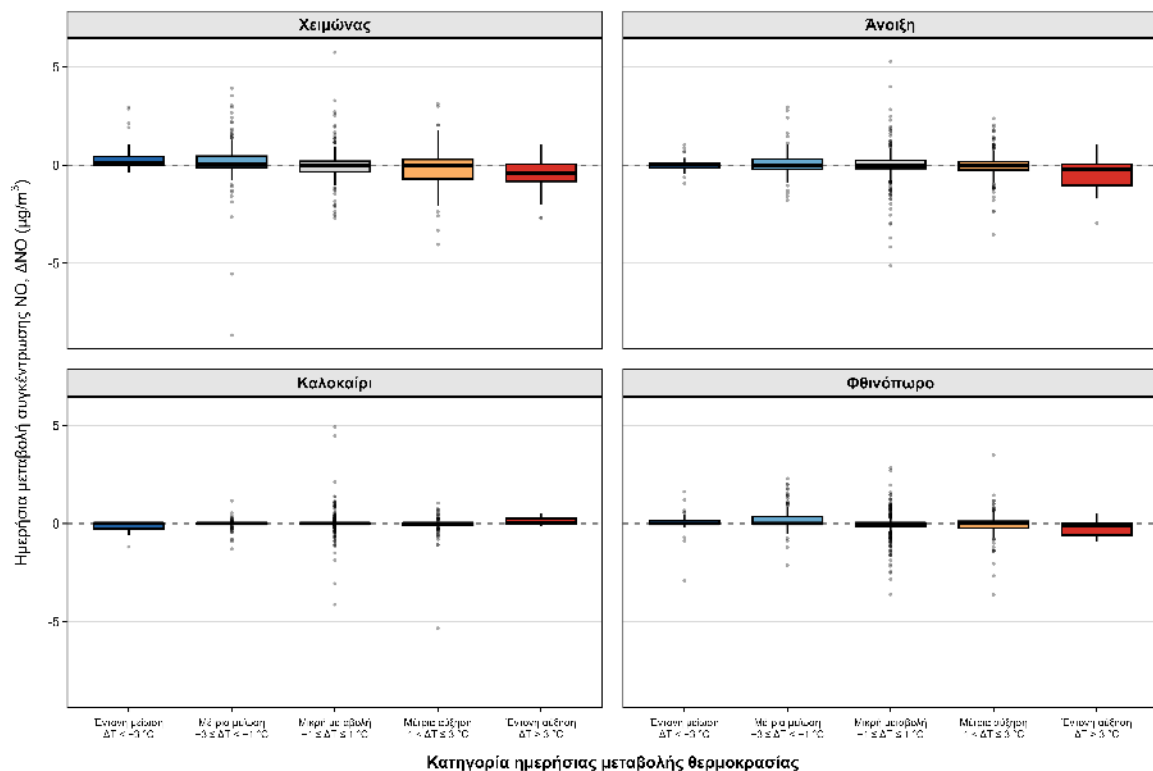
Τα αντίστοιχα διαγράμματα πλαισίου και απολήξεων παρουσιάζονται στα Σχήματα 4.23–4.27. Τα διαγράμματα επιτρέπουν τη σύγκριση της διαμέσου, του ενδοτεταρτημοριακού εύρους, της έκτασης των απολήξεων και των παρατηρήσεων πέρα από αυτές για τη ΔΝΟ μεταξύ των διαφορετικών κατηγοριών ημερήσιας μεταβολής της θερμοκρασίας. Η παρουσίαση έχει περιγραφικό χαρακτήρα και δεν συνιστά αυτοτελή στατιστικό έλεγχο διαφορών μεταξύ των κατηγοριών.



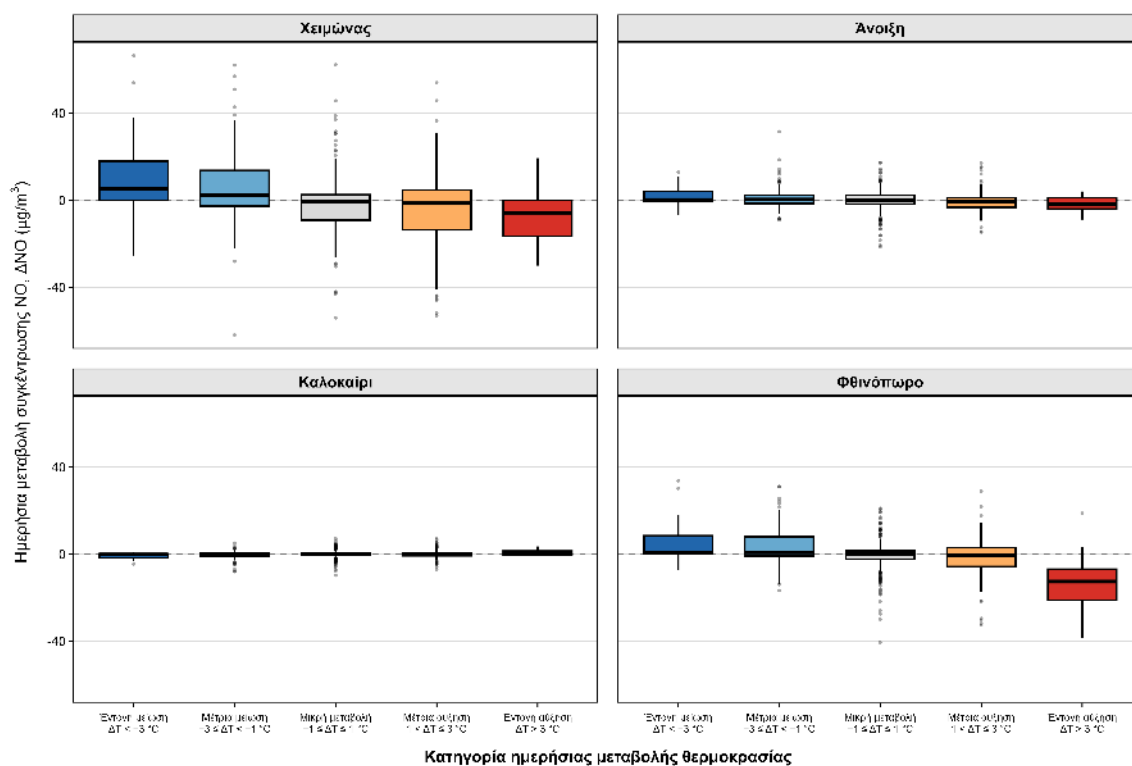
Σχήμα 4.23. Κατανομή της ημερήσιας μεταβολής της συγκέντρωσης NO ανά κατηγορία ημερήσιας μεταβολής της θερμοκρασίας και εποχή στον **σταθμό Αριστοτέλους** κατά την περίοδο 2016–2024.



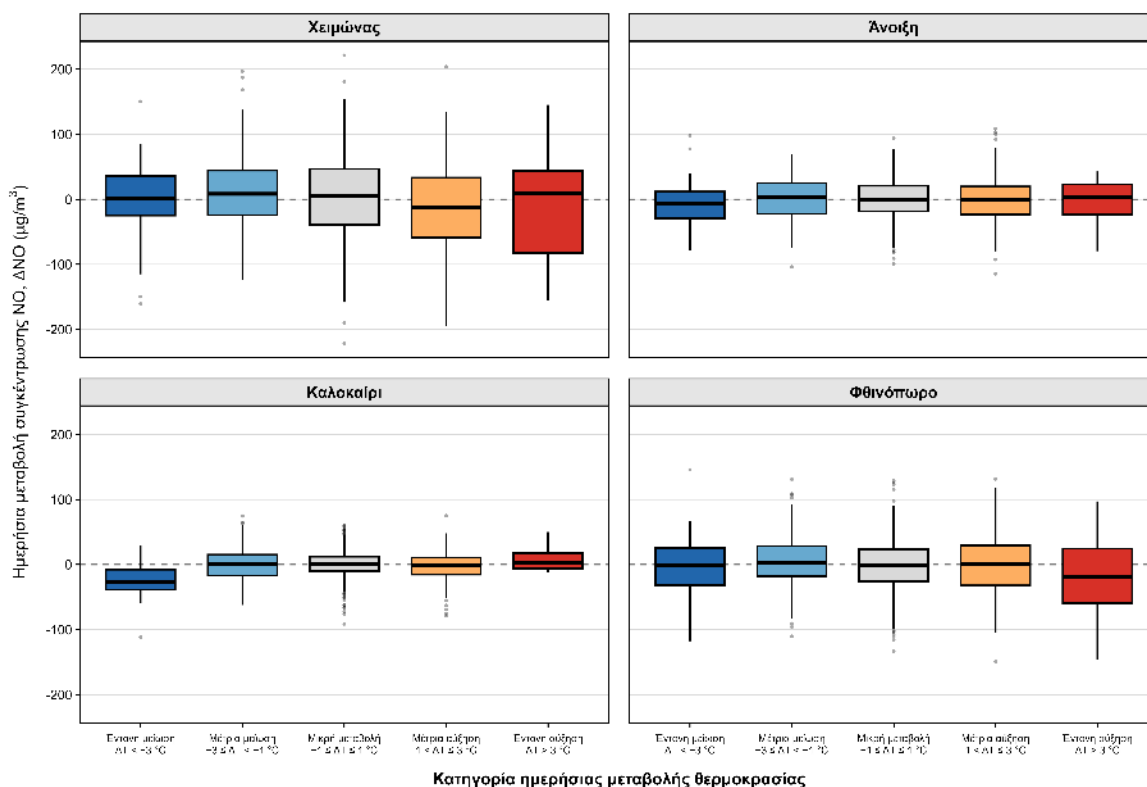
Σχήμα 4.24. Κατανομή της ημερήσιας μεταβολής της συγκέντρωσης NO ανά κατηγορία ημερήσιας μεταβολής της θερμοκρασίας και εποχή στον **σταθμό Ελευσίνας** κατά την περίοδο 2016–2024.



Σχήμα 4.25. Κατανομή της ημερήσιας μεταβολής της συγκέντρωσης NO ανά κατηγορία ημερήσιας μεταβολής της θερμοκρασίας και εποχή στον **σταθμό Θρακομακεδόνων** κατά την περίοδο 2016–2024.



Σχήμα 4.26. Κατανομή της ημερήσιας μεταβολής της συγκέντρωσης NO ανά κατηγορία ημερήσιας μεταβολής της θερμοκρασίας και εποχή στον **σταθμό Λυκόβρυσης** κατά την περίοδο 2016–2024.



Σχήμα 4.27. Κατανομή της ημερήσιας μεταβολής της συγκέντρωσης NO ανά κατηγορία ημερήσιας μεταβολής της θερμοκρασίας και εποχή στον **σταθμό Πατησίων** κατά την περίοδο 2016–2024.

Η συγκριτική εξέταση των Σχημάτων 4.23–4.27 ανέδειξε διαφοροποιήσεις στην κατανομή της ημερήσιας μεταβολής της συγκέντρωσης NO τόσο μεταξύ των εποχών όσο και μεταξύ των κατηγοριών ημερήσιας μεταβολής της θερμοκρασίας. Οι διαφοροποιήσεις αυτές αφορούσαν τη θέση των διαμέσων, το ενδοτεταρτημοριακό εύρος, την έκταση των απολήξεων και την παρουσία παρατηρήσεων πέρα από αυτές.

Στον σταθμό Αριστοτέλους, οι διάμεσοι της ΔNO παρέμειναν γενικά κοντά στη μηδενική τιμή. Οι κυριότερες διαφοροποιήσεις αφορούσαν το ενδοτεταρτημοριακό εύρος και την έκταση των απολήξεων, τα οποία ήταν μεγαλύτερα κατά τον χειμώνα και το φθινόπωρο, υποδηλώνοντας αυξημένη ημερήσια μεταβλητότητα του NO στις συγκεκριμένες εποχές. Κατά τη θερινή περίοδο παρατηρήθηκαν ελαφρώς θετικότερες διάμεσες τιμές ΔNO στις κατηγορίες αύξησης της θερμοκρασίας, χωρίς ωστόσο να διαμορφώνεται σταθερό και βαθμιαίο πρότυπο σε όλες τις εποχές.

Στην Ελευσίνα, οι κατηγορίες αύξησης της θερμοκρασίας συνδέθηκαν περιγραφικά με αρνητικότερες τιμές ΔNO, ιδιαίτερα κατά τον χειμώνα. Η μετατόπιση αυτή ήταν περισσότερο εμφανής στην κατηγορία έντονης αύξησης της θερμοκρασίας. Κατά το καλοκαίρι οι κατανομές ήταν στενότερες και περισσότερο συγκεντρωμένες γύρω από τη μηδενική μεταβολή, στοιχείο που υποδηλώνει μικρότερες ημερήσιες διακυμάνσεις. Παρόμοια εικόνα παρατηρήθηκε στους Θρακομακεδόνες, όπου η μετατόπιση προς αρνητικότερες τιμές ΔNO στις κατηγορίες αύξησης της θερμοκρασίας ήταν περισσότερο εμφανής τον χειμώνα και το φθινόπωρο, ενώ κατά τη θερινή περίοδο οι διαφορές μεταξύ των κατηγοριών ήταν περιορισμένες.

Στη Λυκόβρυση, οι διαφοροποιήσεις μεταξύ των κατηγοριών ήταν εντονότερες κατά τον χειμώνα και το φθινόπωρο. Στις κατηγορίες αύξησης της θερμοκρασίας οι διάμεσοι της ΔNO μετατοπίστηκαν προς αρνητικότερες τιμές, ενώ στις κατηγορίες μείωσης της θερμοκρασίας εμφανίστηκαν θετικότερες διάμεσοι. Η μετάβαση αυτή ήταν ιδιαίτερα εμφανής μεταξύ των δύο ακραίων κατηγοριών μεταβολής της θερμοκρασίας. Το πρότυπο αυτό είναι συμβατό με τις αρνητικές γραμμικές συσχετίσεις που καταγράφηκαν στην προηγούμενη ανάλυση για τις ίδιες εποχές.

Στον σταθμό Πατησίων, οι διαφοροποιήσεις μεταξύ των κατηγοριών αφορούσαν κυρίως τη διασπορά και την έκταση των απολήξεων, ιδιαίτερα κατά τον χειμώνα και το φθινόπωρο. Οι διάμεσοι δεν παρουσίασαν σταθερή και ομοιόμορφη μετατόπιση μεταξύ των κατηγοριών σε όλες τις εποχές, ενώ παρατηρήθηκε σημαντική επικάλυψη των

κατανομών. Το εύρημα αυτό συμφωνεί με τις πολύ ασθενείς συσχετίσεις της προηγούμενης ανάλυσης.

Συνολικά, στην Ελευσίνα, στους Θρακομακεδόνες και στη Λυκόβρυση παρατηρήθηκε συχνότερα μετατόπιση προς αρνητικότερες τιμές ΔΝΟ στις κατηγορίες αύξησης της θερμοκρασίας, κυρίως κατά τον χειμώνα και το φθινόπωρο. Αντίθετα, στον σταθμό Αριστοτέλους και στον σταθμό Πατησίων οι διαφοροποιήσεις ήταν λιγότερο σταθερές και αφορούσαν κυρίως τη μεταβλητότητα των παρατηρήσεων και όχι μία συνεπή μετατόπιση της κεντρικής τάσης. Κατά τη θερινή περίοδο οι κατανομές ήταν γενικά στενότερες και περισσότερο συγκεντρωμένες γύρω από τη μηδενική μεταβολή.

Τα παραπάνω ευρήματα έχουν περιγραφικό χαρακτήρα και δεν τεκμηριώνουν από μόνα τους στατιστικά σημαντικές διαφορές μεταξύ των κατηγοριών. Επιπλέον, η ερμηνεία πρέπει να λαμβάνει υπόψη ότι ο αριθμός των παρατηρήσεων ενδέχεται να διαφοροποιείται μεταξύ των κατηγοριών ημερήσιας μεταβολής της θερμοκρασίας, ιδιαίτερα στις ακραίες κατηγορίες. Συνεπώς, δεν προέκυψε κοινό και ομοιόμορφο πρότυπο για όλους τους σταθμούς και όλες τις εποχές.

4.5.4 Συγκριτική παρουσίαση των αποτελεσμάτων για το NO

Για τη συνολική αποτίμηση της σχέσης μεταξύ της θερμοκρασίας και του μονοξειδίου του αζώτου, τα αποτελέσματα των δύο αναλυτικών προσεγγίσεων παρουσιάζονται συγκεντρωτικά ανά σταθμό μέτρησης και εποχή. Η πρώτη προσέγγιση αφορά τη σχέση μεταξύ της ημερήσιας μέσης θερμοκρασίας και της αντίστοιχης ημερήσιας μέσης συγκέντρωσης NO, ενώ η δεύτερη εξετάζει τη βραχυχρόνια συνδιακύμανση των δύο μεγεθών μέσω της σχέσης μεταξύ των ημερήσιων μεταβολών τους. Η παράλληλη εξέταση των αποτελεσμάτων επιτρέπει τη σύγκριση της κατεύθυνσης, του μεγέθους, της στατιστικής σημαντικότητας και της ερμηνευτικής ικανότητας των επιμέρους γραμμικών μοντέλων, καθώς και την αξιολόγηση της σταθερότητας των παρατηρούμενων σχέσεων μεταξύ εποχών και σταθμών.

Για κάθε συνδυασμό σταθμού και εποχής παρουσιάζονται ο αριθμός των παρατηρήσεων, ο συντελεστής γραμμικής συσχέτισης Pearson r , η μη τυποποιημένη κλίση της απλής γραμμικής παλινδρόμησης β , το 95% διάστημα εμπιστοσύνης της κλίσης, η τιμή p και ο

συντελεστής προσδιορισμού R^2 . Ο συντελεστής r αποτυπώνει την κατεύθυνση και την ισχύ της γραμμικής συσχέτισης, ενώ η κλίση β_1 εκφράζει την εκτιμώμενη μεταβολή της εξαρτημένης μεταβλητής που αντιστοιχεί σε αύξηση της ανεξάρτητης μεταβλητής κατά μία μονάδα. Ο συντελεστής R^2 αποτυπώνει το ποσοστό της παρατηρούμενης μεταβλητότητας της εξαρτημένης μεταβλητής που αντιστοιχεί στο συγκεκριμένο γραμμικό μοντέλο.

Τα συγκεντρωτικά αποτελέσματα των δύο προσεγγίσεων παρουσιάζονται στους Πίνακες 4.4 και 4.5.

Πίνακας 4.4. Συγκεντρωτικά αποτελέσματα της απλής γραμμικής παλινδρόμησης μεταξύ της ημερήσιας μέσης θερμοκρασίας και της ημερήσιας μέσης συγκέντρωσης NO, ανά σταθμό μέτρησης και εποχή, κατά την περίοδο 2016–2024.								
Σταθμός μέτρησης NO	Μετεωρολογικός σταθμός	Εποχή	n	r	Κλίση β_1	95% ΔΕ της κλίσης	p	R^2
Αριστοτέλους	Ελληνικό	Χειμώνας	776	0,086	1,434	[0,256, 2,613]	0,017	0,007
Αριστοτέλους	Ελληνικό	Ανοιξη	774	-0,104	-0,480	[-0,805, -0,154]	0,004	0,011
Αριστοτέλους	Ελληνικό	Καλοκαίρι	667	0,077	0,325	[0,005, 0,645]	0,047	0,006
Αριστοτέλους	Ελληνικό	Φθινόπωρο	654	-0,264	-1,975	[-2,529, -1,420]	< 0,001	0,070
Ελευσίνα	Ελευσίνα	Χειμώνας	799	0,155	0,735	[0,409, 1,062]	< 0,001	0,024
Ελευσίνα	Ελευσίνα	Ανοιξη	814	0,012	0,028	[-0,138, 0,194]	0,742	0,000
Ελευσίνα	Ελευσίνα	Καλοκαίρι	748	-0,268	-0,430	[-0,541, -0,319]	< 0,001	0,072
Ελευσίνα	Ελευσίνα	Φθινόπωρο	780	-0,224	-0,431	[-0,563, -0,299]	< 0,001	0,050
Θρακομακεδόνες	Τατόι	Χειμώνας	693	0,020	0,008	[-0,023, 0,040]	0,598	0,000
Θρακομακεδόνες	Τατόι	Ανοιξη	717	0,038	0,014	[-0,012, 0,040]	0,306	0,001
Θρακομακεδόνες	Τατόι	Καλοκαίρι	707	-0,019	-0,003	[-0,017, 0,010]	0,621	0,000
Θρακομακεδόνες	Τατόι	Φθινόπωρο	702	-0,166	-0,022	[-0,032, -0,012]	< 0,001	0,027
Λυκόβρυση	Τατόι	Χειμώνας	631	-0,134	-0,621	[-0,980, -0,263]	< 0,001	0,018
Λυκόβρυση	Τατόι	Ανοιξη	712	-0,146	-0,159	[-0,238, -0,079]	< 0,001	0,021
Λυκόβρυση	Τατόι	Καλοκαίρι	759	-0,035	-0,025	[-0,075, 0,025]	0,332	0,001
Λυκόβρυση	Τατόι	Φθινόπωρο	665	-0,388	-0,804	[-0,950, -0,658]	< 0,001	0,150
Πατήσια	Ελληνικό	Χειμώνας	784	0,137	2,776	[1,370, 4,183]	< 0,001	0,019
Πατήσια	Ελληνικό	Ανοιξη	778	0,111	0,968	[0,358, 1,578]	0,002	0,012
Πατήσια	Ελληνικό	Καλοκαίρι	753	-0,183	-2,081	[-2,882, -1,279]	< 0,001	0,033
Πατήσια	Ελληνικό	Φθινόπωρο	741	-0,166	-1,887	[-2,695, -1,080]	< 0,001	0,028

Πίνακας 4.4. Συγκεντρωτικά αποτελέσματα της απλής γραμμικής παλινδρόμησης μεταξύ της ημερήσιας μέσης θερμοκρασίας και της ημερήσιας μέσης συγκέντρωσης NO, ανά σταθμό μέτρησης και εποχή, κατά την περίοδο 2016–2024.

Πίνακας 4.5. Συγκεντρωτικά αποτελέσματα της απλής γραμμικής παλινδρόμησης μεταξύ της ημερήσιας μεταβολής της μέσης θερμοκρασίας και της ημερήσιας μεταβολής της συγκέντρωσης NO, ανά σταθμό μέτρησης και εποχή, κατά την περίοδο 2016–2024.

Σταθμός μέτρησης NO	Μετεωρολογικός σταθμός	Εποχή	n	r	Κλίση β ₁	95% ΔΕ της κλίσης	p	R ²
Αριστοτέλους	Ελληνικό	Χειμώνας	754	-0,035	-1,001	[-3,036, 1,033]	0,334	0,001
Αριστοτέλους	Ελληνικό	Ανοιξη	747	0,103	1,205	[0,367, 2,044]	0,005	0,011
Αριστοτέλους	Ελληνικό	Καλοκαίρι	629	0,203	1,595	[0,991, 2,200]	< 0,001	0,041
Αριστοτέλους	Ελληνικό	Φθινόπωρο	634	0,007	0,130	[-1,430, 1,690]	0,870	0,000
Ελευσίνα	Ελευσίνα	Χειμώνας	794	-0,233	-1,669	[-2,155, -1,183]	< 0,001	0,054
Ελευσίνα	Ελευσίνα	Ανοιξη	808	-0,075	-0,381	[-0,732, -0,030]	0,033	0,006
Ελευσίνα	Ελευσίνα	Καλοκαίρι	737	-0,045	-0,105	[-0,271, 0,062]	0,217	0,002
Ελευσίνα	Ελευσίνα	Φθινόπωρο	772	-0,185	-0,916	[-1,260, -0,572]	< 0,001	0,034
Θρακομακεδόνες	Τατόι	Χειμώνας	683	-0,225	-0,100	[-0,133, -0,067]	< 0,001	0,051
Θρακομακεδόνες	Τατόι	Ανοιξη	708	-0,072	-0,034	[-0,068, 0,001]	0,056	0,005
Θρακομακεδόνες	Τατόι	Καλοκαίρι	697	0,022	0,008	[-0,019, 0,034]	0,567	0,000
Θρακομακεδόνες	Τατόι	Φθινόπωρο	696	-0,130	-0,051	[-0,079, -0,022]	< 0,001	0,017
Λυκόβρυση	Τατόι	Χειμώνας	614	-0,311	-2,215	[-2,752, -1,678]	< 0,001	0,097
Λυκόβρυση	Τατόι	Ανοιξη	695	-0,171	-0,512	[-0,732, -0,291]	< 0,001	0,029
Λυκόβρυση	Τατόι	Καλοκαίρι	735	0,143	0,201	[0,100, 0,301]	< 0,001	0,021
Λυκόβρυση	Τατόι	Φθινόπωρο	646	-0,279	-1,549	[-1,961, -1,137]	< 0,001	0,078
Πατήσια	Ελληνικό	Χειμώνας	763	-0,085	-2,921	[-5,358, -0,483]	0,019	0,007
Πατήσια	Ελληνικό	Ανοιξη	749	-0,021	-0,459	[-2,008, 1,090]	0,561	0,000
Πατήσια	Ελληνικό	Καλοκαίρι	719	0,051	0,901	[-0,405, 2,206]	0,176	0,003
Πατήσια	Ελληνικό	Φθινόπωρο	716	-0,049	-1,433	[-3,566, 0,700]	0,188	0,002

Πίνακας 4.5. Συγκεντρωτικά αποτελέσματα της απλής γραμμικής παλινδρόμησης μεταξύ της ημερήσιας μεταβολής της μέσης θερμοκρασίας και της ημερήσιας μεταβολής της συγκέντρωσης NO, ανά σταθμό μέτρησης και εποχή, κατά την περίοδο 2016–2024.

Σημείωση: n = αριθμός παρατηρήσεων, r = συντελεστής γραμμικής συσχέτισης Pearson, β = μη τυποποιημένη κλίση της απλής γραμμικής παλινδρόμησης, 95% ΔΕ = 95% διάστημα εμπιστοσύνης της κλίσης, p = τιμή στατιστικής σημαντικότητας και R^2 = συντελεστής προσδιορισμού.

Η συγκριτική εξέταση των Πινάκων 4.4 και 4.5 αναδεικνύει σημαντική ετερογένεια στη σχέση θερμοκρασίας–NO τόσο μεταξύ των σταθμών όσο και μεταξύ των εποχών. Η κατεύθυνση των συσχετίσεων δεν παρέμεινε σταθερή, ενώ οι περισσότερες σχέσεις χαρακτηρίστηκαν ως πολύ ασθενείς ή ασθενείς. Το εύρημα αυτό υποδηλώνει ότι η θερμοκρασία δεν παρουσιάζει ενιαία και ομοιόμορφη γραμμική σχέση με τις

συγκεντρώσεις NO στο σύνολο του δικτύου μέτρησης, αλλά ότι η παρατηρούμενη συσχέτιση διαφοροποιείται ανάλογα με την εποχή και τον σταθμό.

Στην ανάλυση των ημερήσιων μέσων τιμών, η ισχυρότερη αρνητική συσχέτιση καταγράφηκε στη Λυκόβρυση κατά το φθινόπωρο, με $r=-0,388$, $\beta=-0,804$, $R^2=0,150$ και $p<0,001$. Στο πλαίσιο του αντίστοιχου γραμμικού μοντέλου, αύξηση της ημερήσιας μέσης θερμοκρασίας κατά 1°C αντιστοιχούσε σε εκτιμώμενη μείωση της συγκέντρωσης NO κατά $0,804\text{ }\mu\text{g}/\text{m}^3$. Ωστόσο, ακόμη και στη συγκεκριμένη περίπτωση, το μοντέλο απέδωσε μόνο το 15,0% της παρατηρούμενης μεταβλητότητας, γεγονός που δείχνει ότι το μεγαλύτερο μέρος της διακύμανσης δεν αποτυπώθηκε από τη θερμοκρασία ως μοναδική ανεξάρτητη μεταβλητή.

Αρνητικές και στατιστικά σημαντικές συσχετίσεις καταγράφηκαν επίσης στην Ελευσίνα κατά το καλοκαίρι και το φθινόπωρο, στον σταθμό Αριστοτέλους κατά το φθινόπωρο και στον σταθμό Πατησίων κατά το καλοκαίρι και το φθινόπωρο. Αντίθετα, ασθενείς θετικές συσχετίσεις παρατηρήθηκαν κυρίως κατά τον χειμώνα στην Ελευσίνα και στον σταθμό Πατησίων, καθώς και κατά την άνοιξη στον σταθμό Πατησίων. Στους Θρακομακεδόνες οι συσχετίσεις ήταν πρακτικά μηδενικές κατά τον χειμώνα, την άνοιξη και το καλοκαίρι, ενώ μόνο το φθινόπωρο καταγράφηκε ασθενής αρνητική σχέση. Συνεπώς, ούτε η κατεύθυνση ούτε το μέγεθος της σχέσης μεταξύ ημερήσιας μέσης θερμοκρασίας και συγκέντρωσης NO παρουσίασαν σταθερό πρότυπο στο σύνολο των σταθμών.

Η ανάλυση των ημερήσιων μεταβολών ανέδειξε επίσης κυρίως πολύ ασθενείς ή ασθενείς σχέσεις. Η ισχυρότερη αρνητική συσχέτιση καταγράφηκε στη Λυκόβρυση κατά τον χειμώνα, με $r=-0,311$, $\beta=-2,215$, $R^2=0,097$ και $p<0,001$. Ακολούθησε η Λυκόβρυση κατά το φθινόπωρο, με $r=-0,279$, $\beta=-1,549$, $R^2=0,078$ και $p<0,001$. Αρνητικές συσχετίσεις παρατηρήθηκαν επίσης στην Ελευσίνα και στους Θρακομακεδόνες, κυρίως κατά τον χειμώνα και το φθινόπωρο. Στις συγκεκριμένες εποχές και θέσεις, θετικότερες ημερήσιες μεταβολές της θερμοκρασίας συνδέθηκαν με αρνητικότερες ημερήσιες μεταβολές της συγκέντρωσης NO.

Διαφορετική συμπεριφορά παρουσίασε ο σταθμός Αριστοτέλους, όπου κατά το καλοκαίρι καταγράφηκε ασθενής θετική συσχέτιση μεταξύ ΔT και ΔNO , με $r=0,203$, $\beta=1,595$, $R^2=0,041$ και $p<0,001$. Ασθενής θετική συσχέτιση παρατηρήθηκε επίσης στη Λυκόβρυση κατά το καλοκαίρι. Στον σταθμό Πατησίων οι συσχετίσεις μεταξύ των ημερήσιων μεταβολών ήταν πολύ ασθενείς ή σχεδόν μηδενικές σε όλες τις εποχές, ενώ μόνο η χειμερινή αρνητική συσχέτιση ήταν στατιστικά σημαντική. Επομένως, η χρήση των

ημερήσιων διαφορών δεν ανέδειξε σταθερότερο ή περισσότερο γενικεύσιμο γραμμικό πρότυπο σε σύγκριση με την ανάλυση των ημερήσιων μέσων τιμών.

Η περιγραφική σύγκριση των δύο προσεγγίσεων δεν παρέχει ένδειξη συνολικής ενίσχυσης της ερμηνευτικής ικανότητας με τη χρήση των ημερήσιων μεταβολών. Η μέγιστη τιμή του R^2 στην ανάλυση των ημερήσιων μέσων τιμών ήταν 0,150, ενώ στην ανάλυση των ημερήσιων μεταβολών ήταν 0,097. Η σύγκριση αυτή πρέπει να ερμηνεύεται με προσοχή, επειδή οι δύο προσεγγίσεις αφορούν διαφορετικές εξαρτημένες μεταβλητές. Ωστόσο, τα αποτελέσματα υποδηλώνουν ότι ο περιορισμός της επίδρασης των επιπέδων και των βραδύτερων χρονικών μεταβολών μέσω της χρήσης πρώτων διαφορών δεν οδήγησε σε σαφώς ισχυρότερη γραμμική συνδιακύμανση μεταξύ ΔT και ΔNO .

Ιδιαίτερη σημασία έχει η διάκριση μεταξύ στατιστικής σημαντικότητας και ουσιαστικού μεγέθους της σχέσης. Αρκετές συσχετίσεις παρουσίασαν τιμές $p < 0,05$, γεγονός που πρέπει να αξιολογείται σε συνδυασμό με το μεγάλο μέγεθος των επιμέρους δειγμάτων. Οι χαμηλές τιμές των r και R^2 δείχνουν ότι η πρακτική και ερμηνευτική ισχύς των περισσότερων σχέσεων παρέμεινε περιορισμένη. Συνεπώς, η στατιστική σημαντικότητα δεν συνιστά από μόνη της ένδειξη ισχυρής εξάρτησης της συγκέντρωσης NO από τη θερμοκρασία.

Συνολικά, τα αποτελέσματα δείχνουν ότι η θερμοκρασία συνδέεται με μέρος μόνο της χρονικής μεταβλητότητας του NO . Η απουσία σταθερού προτύπου μεταξύ σταθμών και εποχών υποδηλώνει ότι οι συγκεντρώσεις του ρύπου ενδέχεται να διαμορφώνονται από τη συνδυασμένη επίδραση των τοπικών εκπομπών, της κυκλοφορίας, των συνθηκών ατμοσφαιρικής διασποράς, του ύψους του οριακού στρώματος και άλλων μετεωρολογικών παραμέτρων. Επειδή οι παράγοντες αυτοί δεν ενσωματώθηκαν στα συγκεκριμένα διμεταβλητά μοντέλα, η επιμέρους συμβολή τους δεν μπορεί να προσδιοριστεί από την παρούσα ανάλυση. Επομένως, η σχέση θερμοκρασίας- NO χαρακτηρίζεται ως χωρικά και εποχικά μεταβαλλόμενη, με συνολικά περιορισμένη γραμμική ερμηνευτική ικανότητα.

4.6 Σχέση θερμοκρασίας και διοξειδίου του αζώτου (NO_2)

Η σχέση μεταξύ της θερμοκρασίας και της συγκέντρωσης διοξειδίου του αζώτου (NO_2) διερευνήθηκε μέσω δύο συμπληρωματικών αναλυτικών προσεγγίσεων. Αρχικά εξετάστηκε η σχέση μεταξύ της ημερήσιας μέσης θερμοκρασίας και της αντίστοιχης ημερήσιας μέσης συγκέντρωσης NO_2 . Στη συνέχεια διερευνήθηκε η σχέση μεταξύ των ημερήσιων μεταβολών των δύο μεγεθών, με σκοπό την αποτύπωση της βραχυχρόνιας συνδιακύμανσής τους.

Οι αναλύσεις πραγματοποιήθηκαν χωριστά ανά εποχή και σταθμό μέτρησης και βασίστηκαν αποκλειστικά σε ημέρες με ταυτόχρονα έγκυρες παρατηρήσεις θερμοκρασίας και NO_2 . Για την ανάλυση των ημερήσιων μεταβολών χρησιμοποιήθηκαν μόνο ζεύγη παρατηρήσεων που αντιστοιχούσαν σε πραγματικά διαδοχικές ημερομηνίες, ώστε να αποκλείονται μεταβολές που θα μπορούσαν να προκύψουν από χρονικά κενά στις χρονοσειρές.

Η πρώτη προσέγγιση αποτυπώνει τη γραμμική σχέση μεταξύ των ημερήσιων επιπέδων των δύο μεταβλητών, ενώ η δεύτερη περιορίζει την επίδραση των απόλυτων επιπέδων και εστιάζει στη μεταξύ διαδοχικών ημερών συνδιακύμανσή τους. Και στις δύο περιπτώσεις, τα αποτελέσματα ερμηνεύονται ως συσχετιστικά και δεν τεκμηριώνουν αιτιώδη επίδραση της θερμοκρασίας στις συγκεντρώσεις NO_2 .

4.6.1 Σχέση ημερήσιας μέσης θερμοκρασίας και ημερήσιας συγκέντρωσης NO_2 ανά εποχή και σταθμό

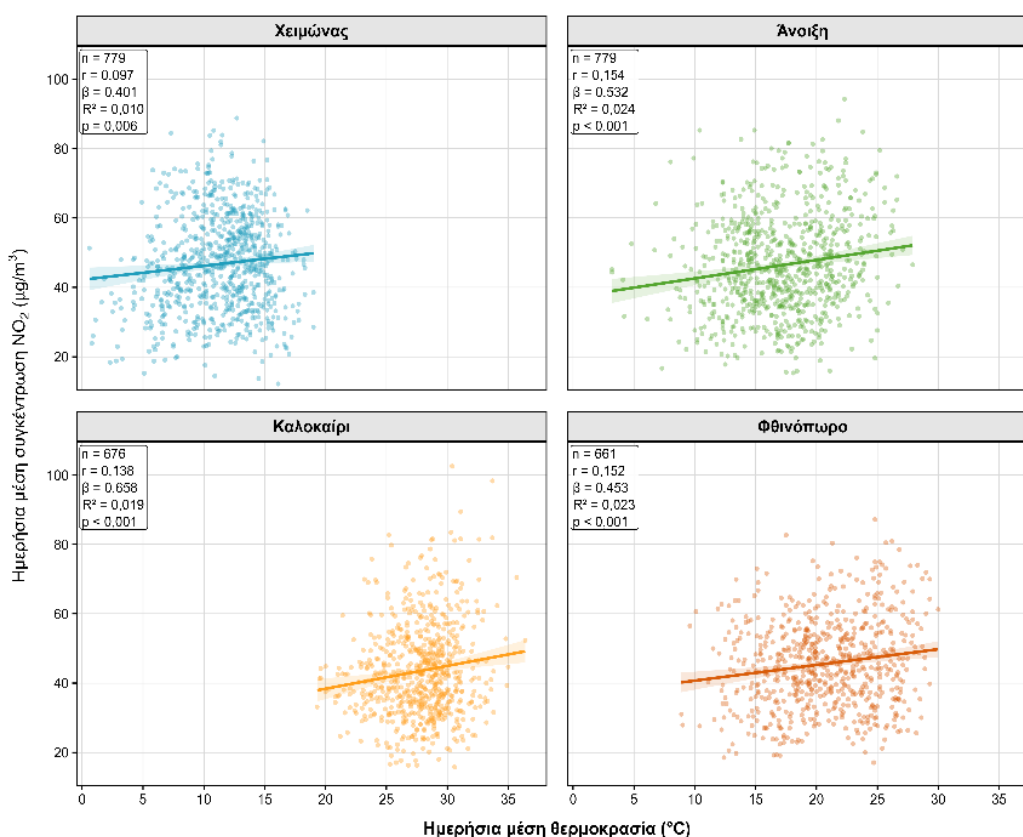
Η σχέση μεταξύ της ημερήσιας μέσης θερμοκρασίας και της ημερήσιας μέσης συγκέντρωσης NO_2 εξετάστηκε χωριστά για κάθε εποχή και σταθμό μέτρησης, με βάση τις ημέρες για τις οποίες υπήρχαν ταυτόχρονα έγκυρες παρατηρήσεις και για τις δύο μεταβλητές. Για κάθε συνδυασμό εποχής και σταθμού εφαρμόστηκε απλό γραμμικό μοντέλο παλινδρόμησης, προκειμένου να εκτιμηθούν η κατεύθυνση και το μέγεθος της γραμμικής σχέσης.

Για κάθε επιμέρους ανάλυση υπολογίστηκαν ο αριθμός των κοινών έγκυρων παρατηρήσεων, ο συντελεστής γραμμικής συσχέτισης Pearson r , η μη τυποποιημένη κλίση της παλινδρόμησης β , το 95% διάστημα εμπιστοσύνης της κλίσης, η τιμή στατιστικής σημαντικότητας p και ο συντελεστής προσδιορισμού R^2 . Η κλίση β_1 εκφράζει την

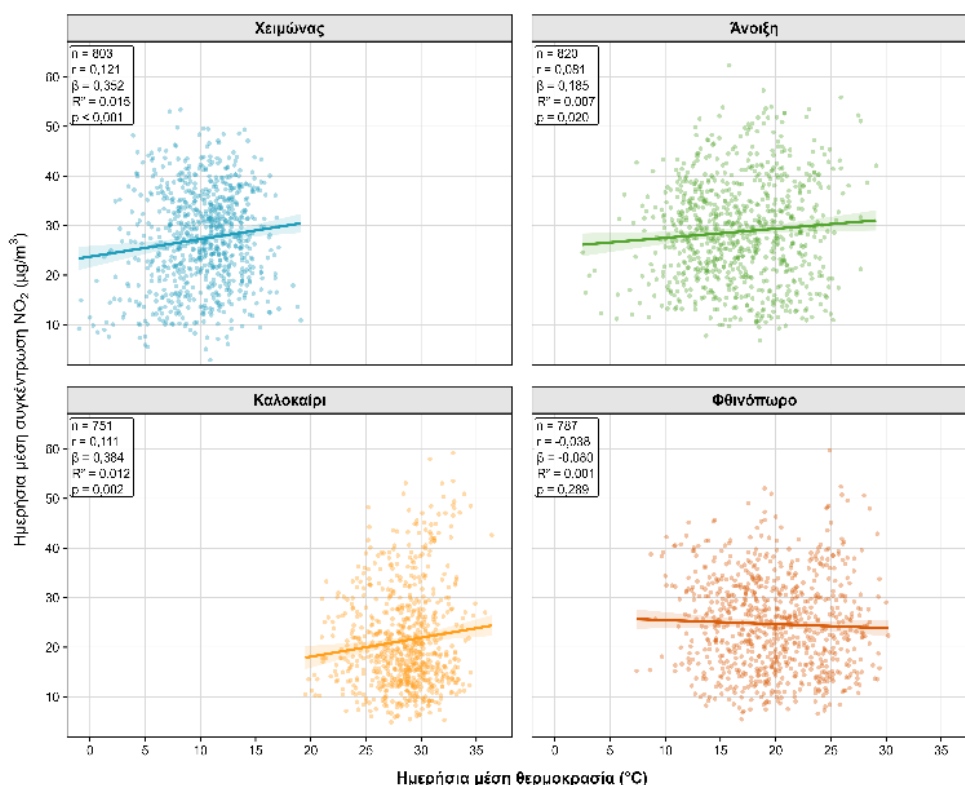
εκτιμώμενη μεταβολή της ημερήσιας συγκέντρωσης NO_2 , σε $\mu\text{g}/\text{m}^3$, η οποία αντιστοιχεί σε αύξηση της ημερήσιας μέσης θερμοκρασίας κατά 1°C .

Η εποχική στρωματοποίηση της ανάλυσης επιλέχθηκε ώστε να περιοριστεί η επίδραση των έντονων διαφορών των θερμοκρασιακών επιπέδων μεταξύ των εποχών και να διερευνηθεί κατά πόσο η σχέση θερμοκρασίας– NO_2 μεταβάλλεται υπό διαφορετικές εποχικές συνθήκες. Παράλληλα, η χωριστή εξέταση των σταθμών επιτρέπει την ανάδειξη πιθανών χωρικών διαφοροποιήσεων, οι οποίες μπορεί να συνδέονται με τον λειτουργικό χαρακτήρα και τις τοπικές συνθήκες κάθε θέσης μέτρησης.

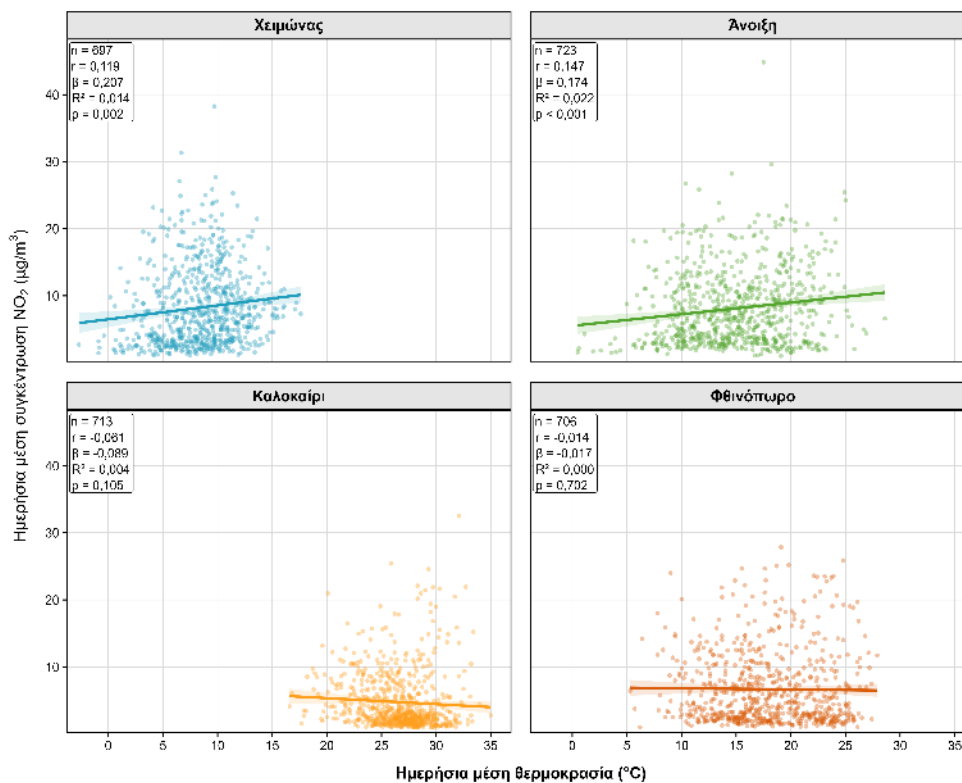
Στα διαγράμματα παρουσιάζονται οι επιμέρους ημερήσιες παρατηρήσεις, η εκτιμώμενη γραμμή απλής γραμμικής παλινδρόμησης, το αντίστοιχο διάστημα εμπιστοσύνης 95% και τα βασικά στατιστικά μεγέθη κάθε μοντέλου. Η οπτική εξέταση της διασποράς των σημείων συμπληρώνει τους αριθμητικούς δείκτες, καθώς επιτρέπει την αξιολόγηση της συγκέντρωσης των παρατηρήσεων γύρω από τη γραμμή παλινδρόμησης και της παρουσίας ημερών με ιδιαίτερα υψηλές ή χαμηλές συγκεντρώσεις NO_2 . Τα αποτελέσματα απεικονίζονται στα Σχήματα 4.28–4.32.



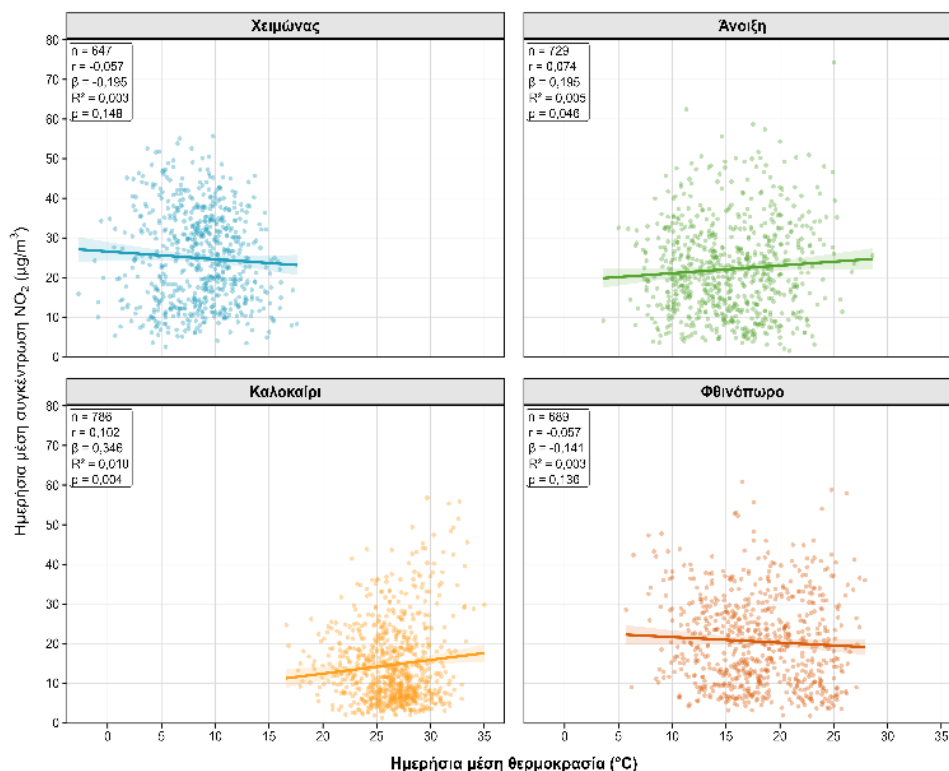
Σχήμα 4.28. Σχέση μεταξύ της ημερήσιας μέσης θερμοκρασίας και της ημερήσιας μέσης συγκέντρωσης NO_2 ανά εποχή στον **σταθμό Αριστοτέλους** κατά την περίοδο 2016–2024.



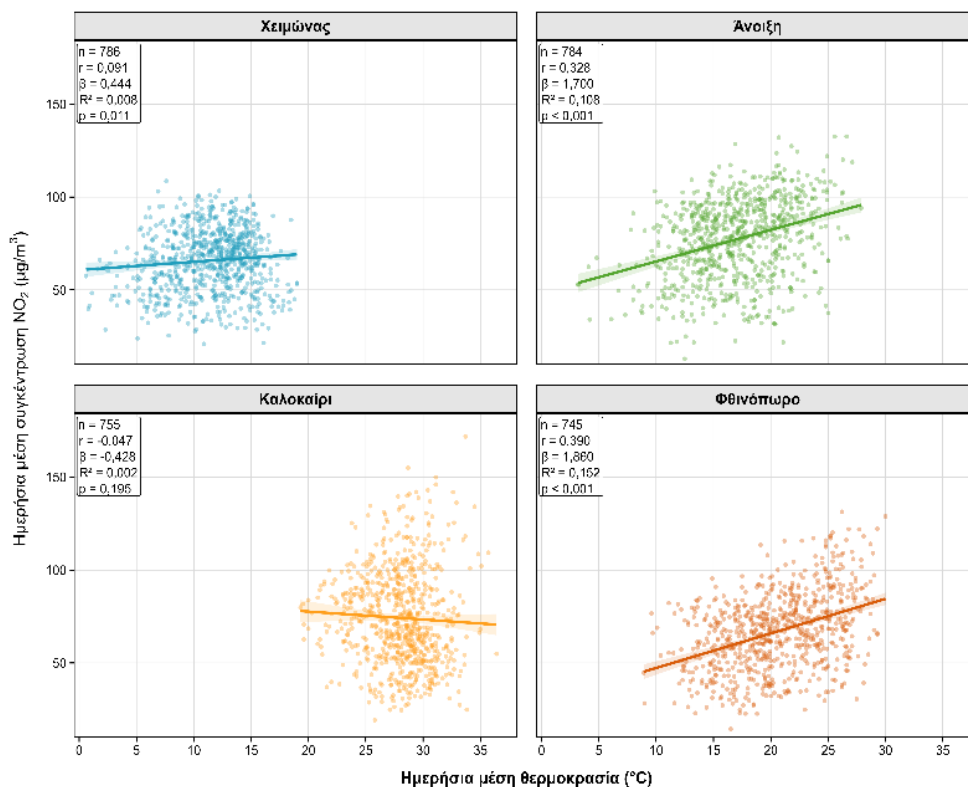
Σχήμα 4.29. Σχέση μεταξύ της ημερήσιας μέσης θερμοκρασίας και της ημερήσιας μέσης συγκέντρωσης NO₂ ανά εποχή στον **σταθμό Ελευσίνας** κατά την περίοδο 2016–2024.



Σχήμα 4.30. Σχέση μεταξύ της ημερήσιας μέσης θερμοκρασίας και της ημερήσιας μέσης συγκέντρωσης NO₂ ανά εποχή στον **σταθμό Θρακομακεδόνων** κατά την περίοδο 2016–2024.



Σχήμα 4.31. Σχέση μεταξύ της ημερήσιας μέσης θερμοκρασίας και της ημερήσιας μέσης συγκέντρωσης NO₂ ανά εποχή στον **σταθμό Λυκόβρυσης** κατά την περίοδο 2016–2024.



Σχήμα 4.32. Σχέση μεταξύ της ημερήσιας μέσης θερμοκρασίας και της ημερήσιας μέσης συγκέντρωσης NO₂ ανά εποχή στον **σταθμό Πατησίων** κατά την περίοδο 2016–2024.

Η εξέταση των Σχημάτων 4.28–4.32 δείχνει ότι η γραμμική σχέση μεταξύ της ημερήσιας μέσης θερμοκρασίας και της συγκέντρωσης NO₂ δεν ήταν ομοιόμορφη στο σύνολο των σταθμών και των εποχών. Οι περισσότερες εκτιμήσεις χαρακτηρίστηκαν από μικρές απόλυτες τιμές του συντελεστή συσχέτισης και περιορισμένη ερμηνευτική ικανότητα, γεγονός που υποδηλώνει ότι η θερμοκρασία, όταν εξετάζεται ως μοναδική ανεξάρτητη μεταβλητή, αποδίδει μόνο μικρό μέρος της ημερήσιας μεταβλητότητας του NO₂.

Ένα πρώτο πρότυπο αφορά τους σταθμούς Αριστοτέλους, Ελευσίνας και Θρακομακεδόνων, στους οποίους οι θετικές σχέσεις εμφανίστηκαν κυρίως κατά τον χειμώνα και την άνοιξη. Στην Αριστοτέλους η θετική κατεύθυνση διατηρήθηκε σε όλες τις εποχές, με τιμές r από 0,097 έως 0,154 και R^2 από 0,010 έως 0,024. Παρότι οι αντίστοιχες κλίσεις ήταν σταθερά θετικές, από $\beta=0,401$ έως $\beta=0,658$ $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ανά $^{\circ}\text{C}$, το μικρό ποσοστό εξηγούμενης διακύμανσης δείχνει ότι η θερμοκρασία δεν αποτελούσε ισχυρό γραμμικό προσδιοριστικό παράγοντα των συγκεντρώσεων NO₂.

Στην Ελευσίνα παρατηρήθηκε θετική αλλά πολύ ασθενής συσχέτιση κατά τον χειμώνα, την άνοιξη και το καλοκαίρι, με μέγιστη τιμή $r=0,121$ τον χειμώνα. Κατά το φθινόπωρο, η σχέση αντιστράφηκε ως προς την κατεύθυνση, αλλά παρέμεινε ουσιαστικά μηδενική και μη στατιστικά σημαντική ($r=-0,038$, $R^2=0,001$, $p=0,289$). Αντίστοιχα, στους Θρακομακεδόνες οι θετικές σχέσεις περιορίστηκαν στον χειμώνα και την άνοιξη, ενώ το καλοκαίρι και το φθινόπωρο οι εκτιμήσεις ήταν αρνητικές, πολύ μικρού μεγέθους και μη στατιστικά σημαντικές. Η εποχική αυτή μεταβολή της κατεύθυνσης επιβεβαιώνει ότι δεν προέκυψε σταθερός μηχανισμός γραμμικής συνδιακύμανσης.

Η Λυκόβρυση παρουσίασε επίσης μεταβαλλόμενη εποχική συμπεριφορά. Κατά τον χειμώνα και το φθινόπωρο οι συσχετίσεις ήταν ελαφρώς αρνητικές και μη στατιστικά σημαντικές, ενώ την άνοιξη και το καλοκαίρι έγιναν θετικές. Ωστόσο, ακόμη και η μεγαλύτερη τιμή, που καταγράφηκε το καλοκαίρι ($r=0,102$, $\beta=0,346$, $R^2=0,010$, $p=0,004$), αντιστοιχούσε σε πολύ περιορισμένη γραμμική σύνδεση. Επομένως, η στατιστική σημαντικότητα δεν συνοδεύτηκε από αντίστοιχα υψηλή πρακτική ή ερμηνευτική σημασία. Διαφορετική εικόνα παρουσίασε ο σταθμός Πατησίων, όπου εντοπίστηκαν οι υψηλότερες τιμές συσχέτισης και προσδιορισμού. Κατά το φθινόπωρο καταγράφηκε η ισχυρότερη θετική σχέση της ανάλυσης ($r=0,390$, $\beta=1,860$ $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ανά $^{\circ}\text{C}$, $R^2=0,152$, $p<0,001$), ενώ ακολούθησε η άνοιξη ($r=0,328$, $\beta=1,700$ $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ανά $^{\circ}\text{C}$, $R^2=0,108$, $p<0,001$). Στο πλαίσιο

των αντίστοιχων μοντέλων, αύξηση της ημερήσιας μέσης θερμοκρασίας κατά 1°C συνδεόταν με εκτιμώμενη αύξηση της συγκέντρωσης NO_2 κατά $1,860 \mu\text{g}/\text{m}^3$ το φθινόπωρο και κατά $1,700 \mu\text{g}/\text{m}^3$ την άνοιξη. Οι σχέσεις αυτές ήταν σαφώς εντονότερες από εκείνες των υπόλοιπων σταθμών, χωρίς όμως να υπερβαίνουν μέτριο επίπεδο ερμηνευτικής ικανότητας. Κατά τον χειμώνα η συσχέτιση ήταν θετική αλλά πολύ ασθενής, ενώ το καλοκαίρι δεν διαπιστώθηκε στατιστικά σημαντική γραμμική σύνδεση.

Η σύγκριση των σταθμών αναδεικνύει επομένως δύο βασικά χαρακτηριστικά.

Πρώτον, η κατεύθυνση της σχέσης δεν παρέμεινε σταθερή μεταξύ των εποχών, ιδιαίτερα στην Ελευσίνα, στους Θρακομακεδόνες και στη Λυκόβρυση. Δεύτερον, ακόμη και όταν οι σχέσεις ήταν στατιστικά σημαντικές, οι περισσότερες τιμές του R^2 παρέμειναν πολύ χαμηλές. Εξαίρεση αποτέλεσαν κυρίως η άνοιξη και το φθινόπωρο στον σταθμό Πατησίων, όπου τα μοντέλα απέδωσαν το 10,8% και το 15,2% της ημερήσιας μεταβλητότητας του NO_2 , αντίστοιχα.

Η διάκριση μεταξύ στατιστικής σημαντικότητας και μεγέθους επίδρασης είναι κρίσιμη για την ερμηνεία των αποτελεσμάτων. Οι μεγάλοι αριθμοί παρατηρήσεων αυξάνουν την πιθανότητα ανίχνευσης πολύ μικρών συσχετίσεων ως στατιστικά σημαντικών, χωρίς αυτό να συνεπάγεται ισχυρή ή ουσιαστική σχέση. Για τον λόγο αυτό, οι τιμές p πρέπει να αξιολογούνται σε συνδυασμό με το r , την κλίση β , το R^2 και τη συνολική μορφή των διαγραμμάτων διασποράς.

Συνολικά, τα αποτελέσματα δεν υποστηρίζουν ένα ενιαίο εποχικό ή χωρικό πρότυπο στη σχέση θερμοκρασίας- NO_2 . Η παρατηρούμενη συνδιακύμανση μεταβλήθηκε ανάλογα με τον σταθμό και την εποχή και, στις περισσότερες περιπτώσεις, παρέμεινε περιορισμένη. Η διαφοροποίηση αυτή υποδηλώνει ότι οι ημερήσιες συγκεντρώσεις NO_2 πιθανότατα διαμορφώνονται από τη συνδυασμένη επίδραση της θερμοκρασίας με άλλους παράγοντες, όπως οι τοπικές εκπομπές, η ένταση της κυκλοφορίας, οι συνθήκες ατμοσφαιρικής διασποράς, το ύψος του οριακού στρώματος και οι λοιπές μετεωρολογικές μεταβλητές. Συνεπώς, τα ευρήματα πρέπει να ερμηνεύονται ως συσχετιστικά και όχι ως τεκμήρια άμεσης αιτιώδους επίδρασης της θερμοκρασίας στις συγκεντρώσεις NO_2 .

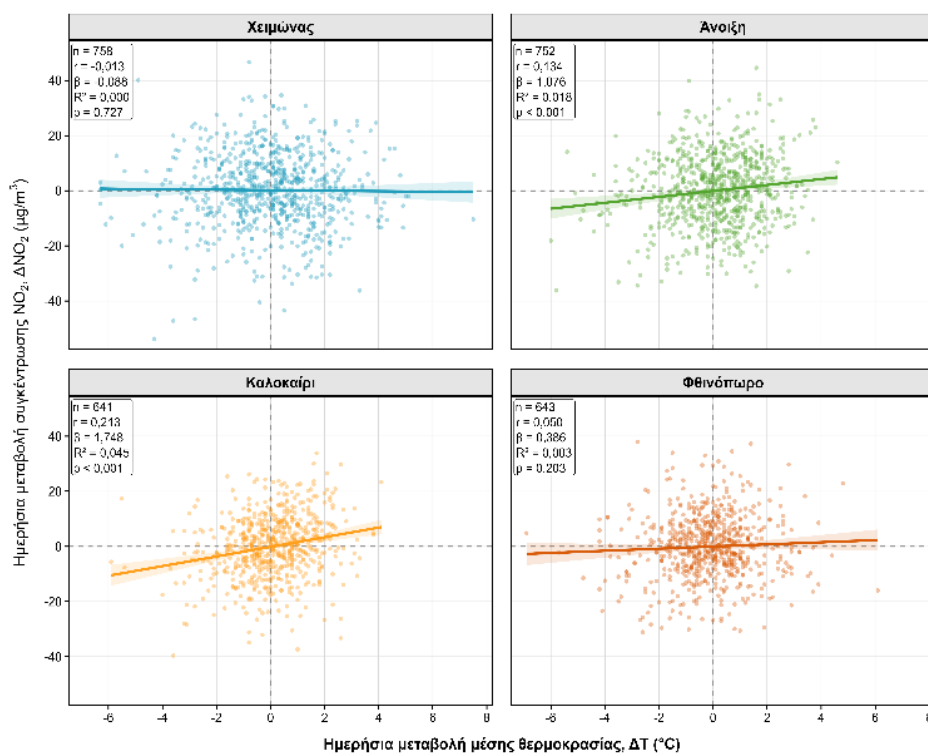
4.6.2 Σχέση ημερήσιας μεταβολής της θερμοκρασίας και ημερήσιας μεταβολής της συγκέντρωσης NO_2 ανά εποχή και σταθμό

Για τη διερεύνηση της βραχυχρόνιας σχέσης μεταξύ θερμοκρασίας και NO_2 αναλύθηκαν οι μεταβολές των δύο μεγεθών από τη μία ημέρα στην αμέσως επόμενη. Στην ανάλυση εντάχθηκαν αποκλειστικά ζεύγη πραγματικά διαδοχικών ημερών με ταυτόχρονα έγκυρες τιμές θερμοκρασίας και συγκέντρωσης NO_2 , ώστε οι υπολογιζόμενες διαφορές να αντανακλούν πραγματικές ημερήσιες μεταβολές και όχι μεταβολές που οφείλονται σε χρονικά κενά των χρονοσειρών.

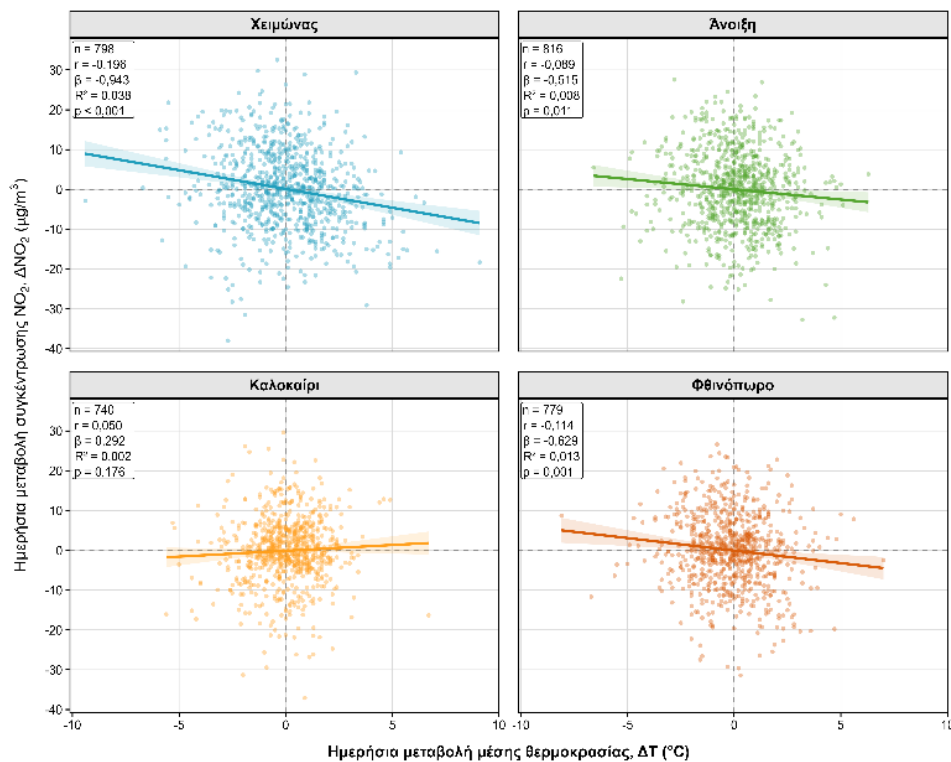
Η σχέση μεταξύ της ημερήσιας μεταβολής της μέσης θερμοκρασίας, ΔT , και της αντίστοιχης μεταβολής της συγκέντρωσης NO_2 , ΔNO_2 , εξετάστηκε χωριστά ανά εποχή και σταθμό μέτρησης με εφαρμογή απλού γραμμικού μοντέλου παλινδρόμησης. Για κάθε επιμέρους ανάλυση προσδιορίστηκαν ο αριθμός των έγκυρων ζευγών παρατηρήσεων, ο συντελεστής γραμμικής συσχέτισης Pearson r , η μη τυποποιημένη κλίση β , το 95% διάστημα εμπιστοσύνης της κλίσης, η τιμή p και ο συντελεστής προσδιορισμού R^2 . Η κλίση β αποτυπώνει την εκτιμώμενη μεταβολή της ΔNO_2 , σε $\mu\text{g}/\text{m}^3$, που αντιστοιχεί σε αύξηση της ΔT κατά 1°C .

Η χρήση των πρώτων διαφορών επιτρέπει την εστίαση στη συνδιακύμανση των δύο μεταβλητών σε ημερήσια χρονική κλίμακα και περιορίζει την επίδραση των απόλυτων επιπέδων και των βραδύτερων χρονικών μεταβολών.

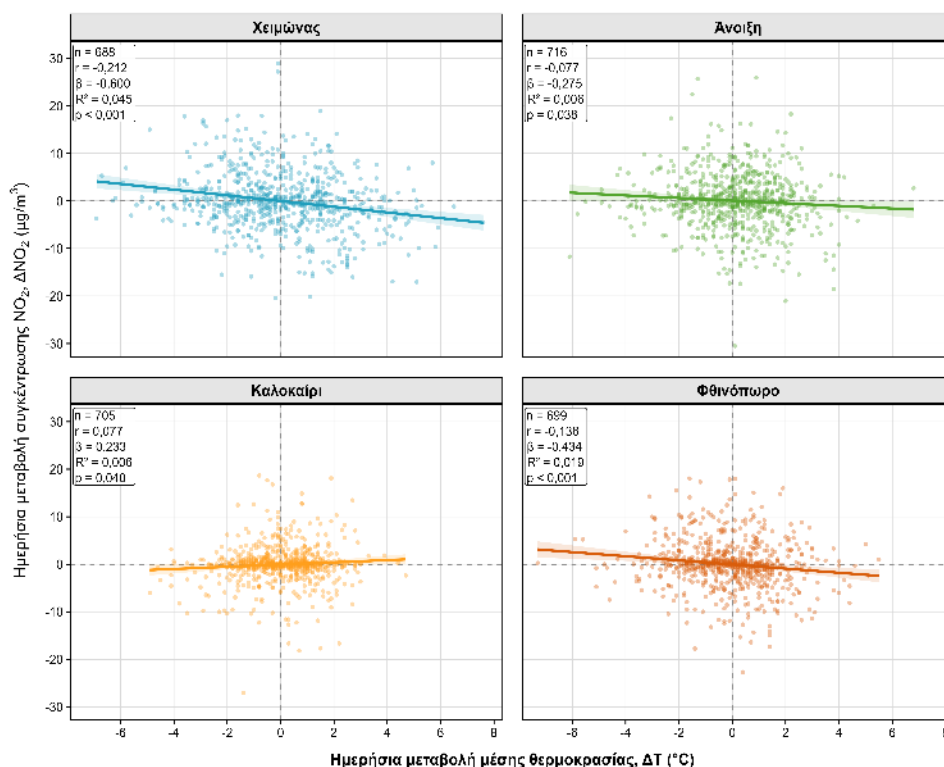
Στα Σχήματα 4.33–4.37 παρουσιάζονται τα διαγράμματα διασποράς, οι εκτιμώμενες γραμμές παλινδρόμησης, τα αντίστοιχα διαστήματα εμπιστοσύνης 95% και τα βασικά στατιστικά μεγέθη κάθε μοντέλου.



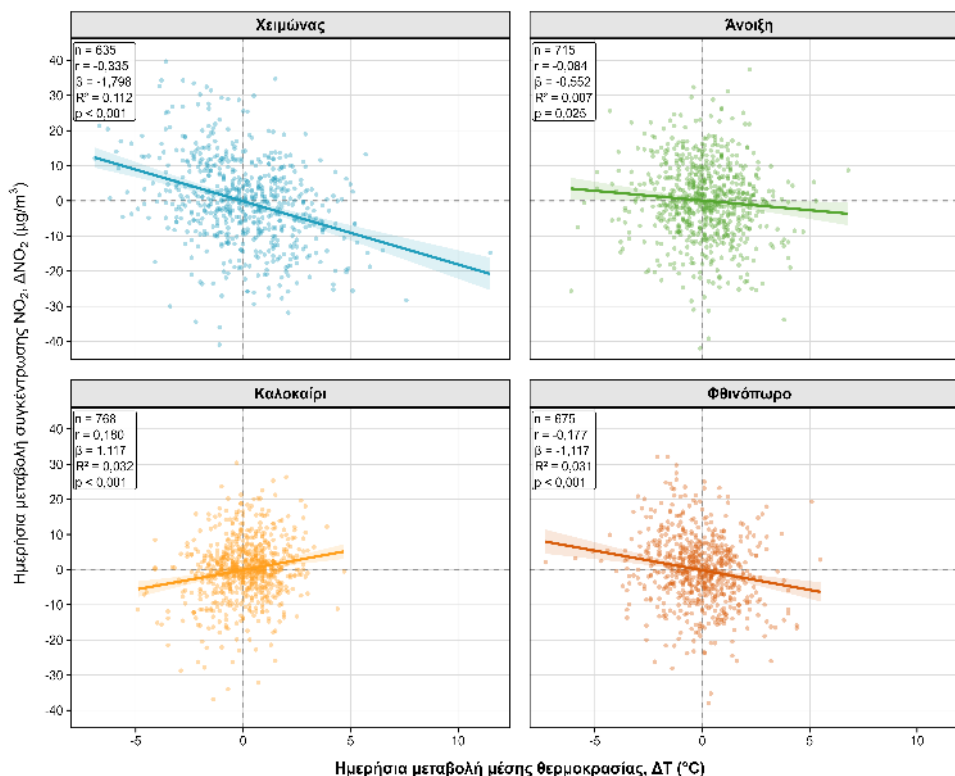
Σχήμα 4.33. Σχέση μεταξύ της ημερήσιας μεταβολής της μέσης θερμοκρασίας και της ημερήσιας μεταβολής της συγκέντρωσης NO_2 ανά εποχή στον **σταθμό Αριστοτέλους** κατά την περίοδο 2016–2024.



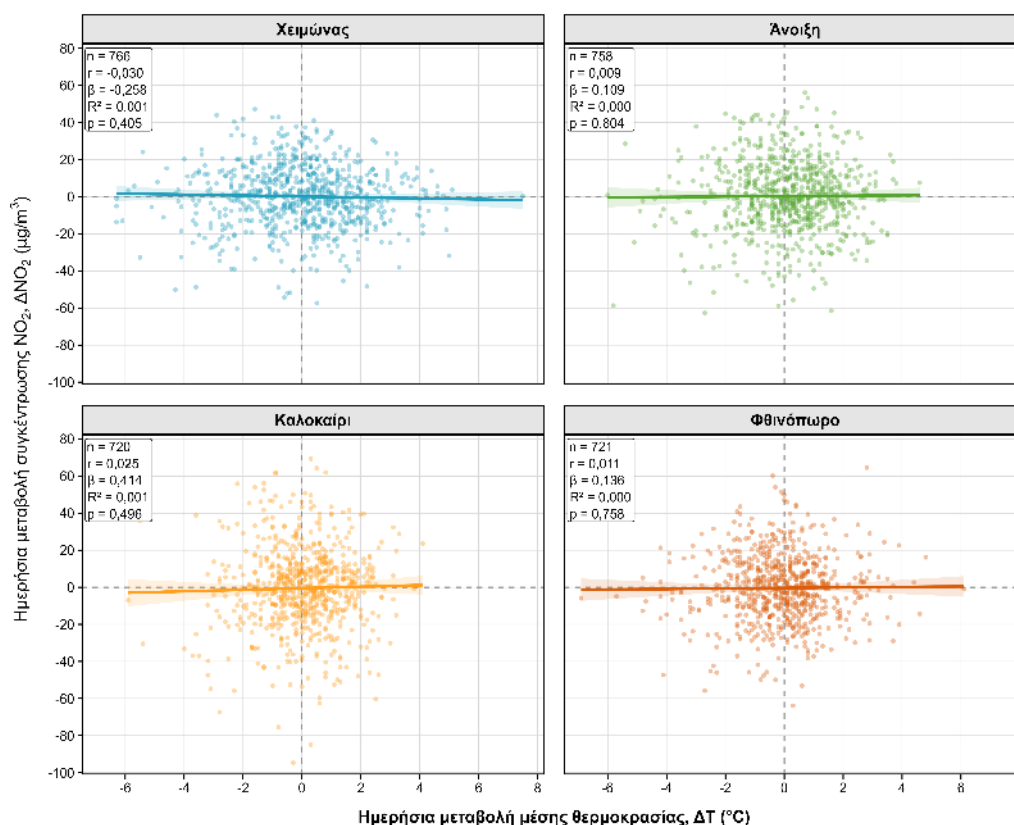
Σχήμα 4.34. Σχέση μεταξύ της ημερήσιας μεταβολής της μέσης θερμοκρασίας και της ημερήσιας μεταβολής της συγκέντρωσης NO_2 ανά εποχή στον **σταθμό Ελευσίνας** κατά την περίοδο 2016–2024.



Σχήμα 4.35. Σχέση μεταξύ της ημερήσιας μεταβολής της μέσης θερμοκρασίας και της ημερήσιας μεταβολής της συγκέντρωσης NO_2 ανά εποχή στον σταθμό Θρακομακεδόνων κατά την περίοδο 2016–2024.



Σχήμα 4.36. Σχέση μεταξύ της ημερήσιας μεταβολής της μέσης θερμοκρασίας και της ημερήσιας μεταβολής της συγκέντρωσης NO_2 ανά εποχή στον σταθμό Λυκόβρυσης κατά την περίοδο 2016–2024.



Σχήμα 4.37. Σχέση μεταξύ της ημερήσιας μεταβολής της μέσης θερμοκρασίας και της ημερήσιας μεταβολής της συγκέντρωσης NO₂ ανά εποχή στον σταθμό **Πατησίων** κατά την περίοδο 2016–2024.

Η ανάλυση των ημερήσιων διαφορών έδειξε ότι η βραχυχρόνια σχέση μεταξύ θερμοκρασίας και NO₂ δεν ήταν σταθερή ούτε χωρικά ούτε εποχικά. Οι συντελεστές συσχέτισης μεταβάλλονταν ως προς το πρόσημο και το μέγεθος, ενώ οι τιμές του R² ήταν κατά κανόνα χαμηλές. Το γεγονός αυτό δείχνει ότι η ημερήσια μεταβολή της θερμοκρασίας εξηγούσε μόνο μικρό μέρος της αντίστοιχης μεταβολής του NO₂.

Τον χειμώνα καταγράφηκε το σαφέστερο αρνητικό πρότυπο. Η ισχυρότερη σχέση εμφανίστηκε στη Λυκόβρυση, με $r=-0,335$, $\beta=-1,798 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ανά °C, $R^2=0,112$ και $p<0,001$. Αρνητικές αλλά ασθενέστερες συσχετίσεις παρατηρήθηκαν στους Θρακομακεδόνες ($r=-0,212$, $R^2=0,045$) και στην Ελευσίνα ($r=-0,196$, $R^2=0,038$). Αντίθετα, στην Αριστοτέλους και στην Πατησίων οι χειμερινές σχέσεις ήταν σχεδόν μηδενικές, γεγονός που δείχνει ότι το αρνητικό πρότυπο δεν ήταν κοινό σε όλους τους σταθμούς.

Την άνοιξη οι συσχετίσεις παρέμειναν γενικά πολύ ασθενείς. Στην Αριστοτέλους προέκυψε θετική σχέση ($r=0,134$, $\beta=1,076$, $R^2=0,018$, $p<0,001$), ενώ στην Ελευσίνα, στους Θρακομακεδόνες και στη Λυκόβρυση οι σχέσεις ήταν αρνητικές αλλά περιορισμένης έντασης. Στην Πατησίων δεν διαπιστώθηκε ουσιαστική γραμμική συσχέτιση.

Το καλοκαίρι παρατηρήθηκε μετατόπιση προς θετικότερες σχέσεις σε ορισμένους σταθμούς. Η ισχυρότερη θετική συσχέτιση καταγράφηκε στην Αριστοτέλους ($r=0,213$, $\beta=1,748$, $R^2=0,045$, $p<0,001$), ενώ θετική σχέση εμφανίστηκε και στη Λυκόβρυση ($r=0,180$, $\beta=1,117$, $R^2=0,032$, $p<0,001$). Στους υπόλοιπους σταθμούς οι σχέσεις ήταν πολύ ασθενείς ή μη στατιστικά σημαντικές.

Το φθινόπωρο επανεμφανίστηκαν αρνητικές σχέσεις στη Λυκόβρυση ($r=-0,177$, $R^2=0,031$), στους Θρακομακεδόνες ($r=-0,138$, $R^2=0,019$) και στην Ελευσίνα ($r=-0,114$, $R^2=0,013$). Στην Αριστοτέλους και στην Πατησίων οι συσχετίσεις ήταν θετικές, αλλά πολύ ασθενείς και μη στατιστικά σημαντικές.

Η Λυκόβρυση εμφάνισε τη μεγαλύτερη εποχική διαφοροποίηση, με αρνητικές σχέσεις τον χειμώνα, την άνοιξη και το φθινόπωρο και θετική σχέση το καλοκαίρι. Αντίθετα, στην Πατησίων δεν προέκυψε στατιστικά σημαντική συσχέτιση σε καμία εποχή, καθώς οι τιμές του r παρέμειναν κοντά στο μηδέν.

Παρά τη στατιστική σημαντικότητα ορισμένων σχέσεων, η ερμηνευτική τους ικανότητα ήταν περιορισμένη. Η υψηλότερη τιμή του R^2 καταγράφηκε στη Λυκόβρυση τον χειμώνα και ήταν 0,112. Επομένως, ακόμη και στην ισχυρότερη περίπτωση, το μεγαλύτερο μέρος της μεταβλητότητας της ΔNO_2 δεν εξηγούνταν από τη ΔT .

Η εικόνα που προέκυψε δεν ανέδειξε ενιαίο χωρικό ή εποχικό πρότυπο. Οι αρνητικές σχέσεις εμφανίστηκαν συχνότερα τον χειμώνα και το φθινόπωρο, ενώ θετικές παρατηρήθηκαν κυρίως το καλοκαίρι σε ορισμένους σταθμούς. Τα ευρήματα δείχνουν ότι η ημερήσια μεταβολή της θερμοκρασίας αποτελεί έναν μόνο από τους παράγοντες που συνδέονται με τη μεταβολή του NO_2 και δεν επιτρέπουν αιτιώδη ερμηνεία.

4.6.3 Κατανομή της ημερήσιας μεταβολής της συγκέντρωσης NO_2 ανά κατηγορία ημερήσιας μεταβολής της θερμοκρασίας

Για τη συμπληρωματική διερεύνηση της βραχυχρόνιας σχέσης μεταξύ θερμοκρασίας και NO_2 , η ημερήσια μεταβολή της μέσης θερμοκρασίας ταξινομήθηκε σε πέντε κατηγορίες, με βάση τόσο την κατεύθυνση όσο και το μέγεθός της. Η προσέγγιση αυτή επιτρέπει την εξέταση της κατανομής της ΔNO_2 σε ομάδες ημερών που χαρακτηρίζονται από παρόμοια θερμοκρασιακή μεταβολή και συμπληρώνει την προηγούμενη ανάλυση, στην οποία η ΔT εξετάστηκε ως συνεχής μεταβλητή.

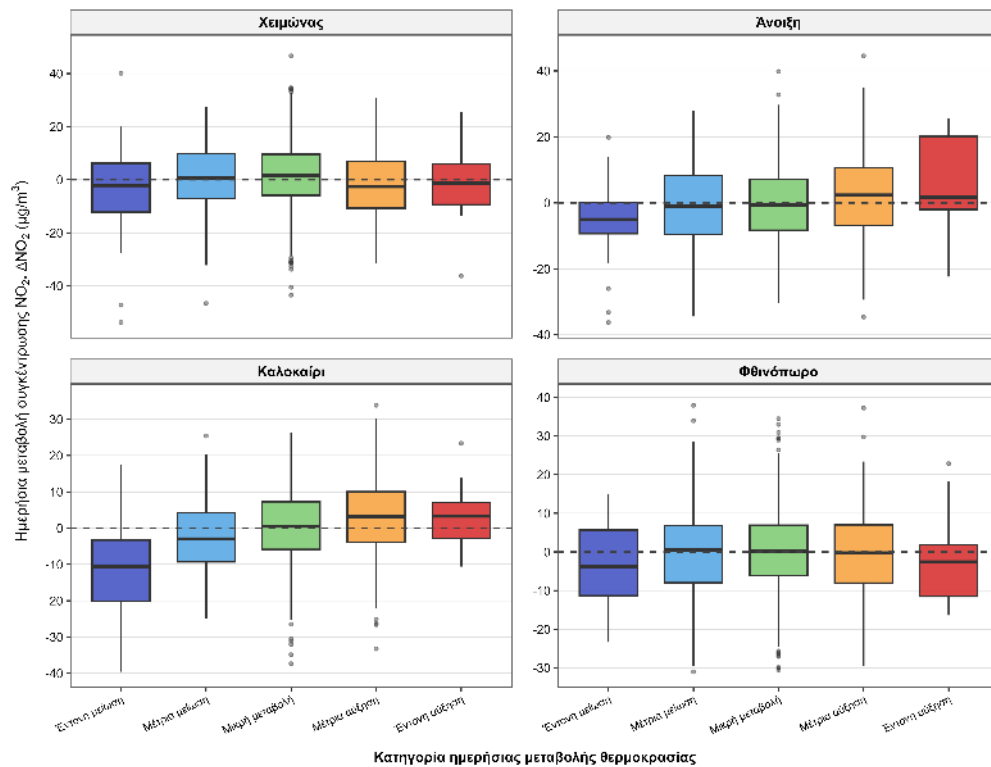
Η ανάλυση πραγματοποιήθηκε χωριστά για κάθε εποχή και σταθμό. Συμπεριλήφθηκαν μόνο ζεύγη πραγματικά διαδοχικών ημερών για τα οποία υπήρχαν ταυτόχρονα έγκυρες τιμές θερμοκρασίας και συγκέντρωσης NO_2 , ώστε οι υπολογιζόμενες ημερήσιες μεταβολές να είναι άμεσα συγκρίσιμες και να μην επηρεάζονται από χρονικά κενά στα δεδομένα.

Οι κατηγορίες της ημερήσιας μεταβολής της θερμοκρασίας ορίστηκαν ως εξής:

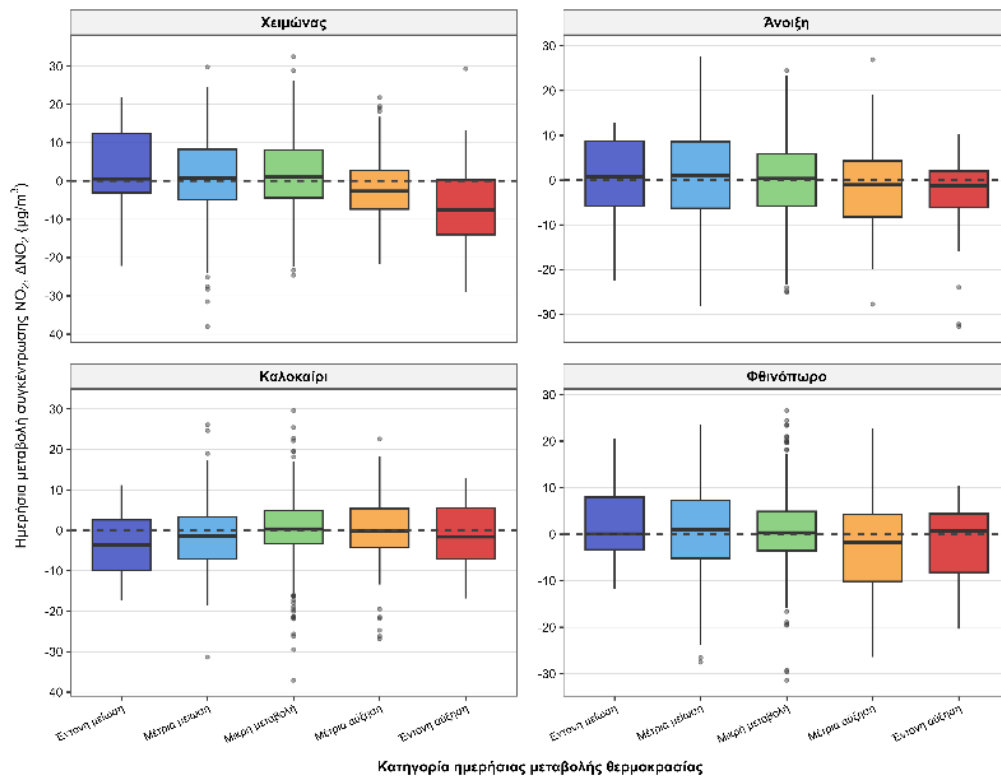
- ισχυρή μείωση: $\Delta T < -3\text{ }^\circ\text{C}$,
- μέτρια μείωση: $-3\text{ }^\circ\text{C} \leq \Delta T < -1\text{ }^\circ\text{C}$,
- μικρή μεταβολή: $-1\text{ }^\circ\text{C} \leq \Delta T < 1\text{ }^\circ\text{C}$,
- μέτρια αύξηση: $1\text{ }^\circ\text{C} \leq \Delta T < 3\text{ }^\circ\text{C}$,
- ισχυρή αύξηση: $\Delta T \geq 3\text{ }^\circ\text{C}$.

Η κατηγοριοποίηση αυτή επιτρέπει να εξεταστεί αν η μεταβολή του NO_2 διαφοροποιείται συστηματικά μεταξύ ημερών με έντονη πτώση της θερμοκρασίας, σχεδόν σταθερές θερμοκρασιακές συνθήκες και έντονη άνοδο της θερμοκρασίας. Παράλληλα, παρέχει μια περισσότερο περιγραφική εικόνα της σχέσης, η οποία δεν περιορίζεται στην εκτίμηση ενός μόνο γραμμικού συντελεστή.

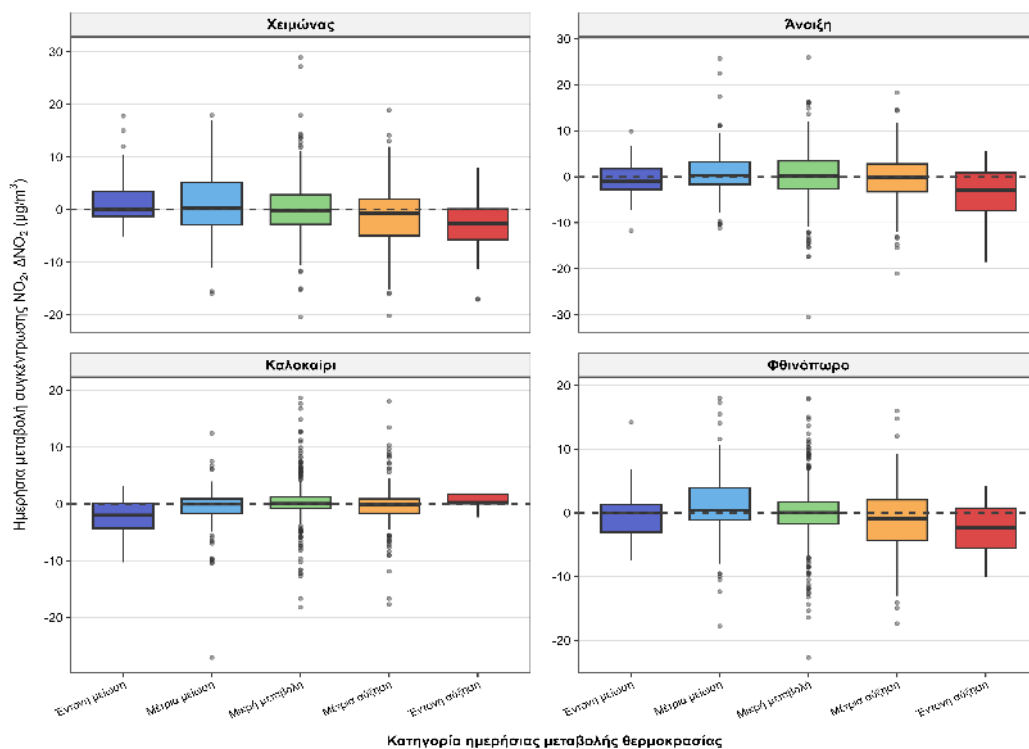
Τα διαγράμματα πλαισίου και απολήξεων των Σχημάτων 4.38–4.42 παρουσιάζουν τη διάμεσο, το ενδοτεταρτημοριακό εύρος, την έκταση των απολήξεων και τις ακραίες παρατηρήσεις της ΔNO_2 για κάθε κατηγορία ΔT . Με τον τρόπο αυτό αξιολογείται τόσο η μετατόπιση της κεντρικής τάσης όσο και η διαφοροποίηση της διασποράς των τιμών μεταξύ κατηγοριών, εποχών και σταθμών. Η σύγκριση των κατανομών επιτρέπει επίσης να διαπιστωθεί αν οι ημέρες με εντονότερες θερμοκρασιακές μεταβολές συνδέονται με συστηματικά διαφορετική συμπεριφορά του NO_2 ή αν οι κατανομές παρουσιάζουν σημαντική επικάλυψη, γεγονός που θα υποδήλωνε ασθενέστερη ή μη σταθερή βραχυχρόνια σχέση.



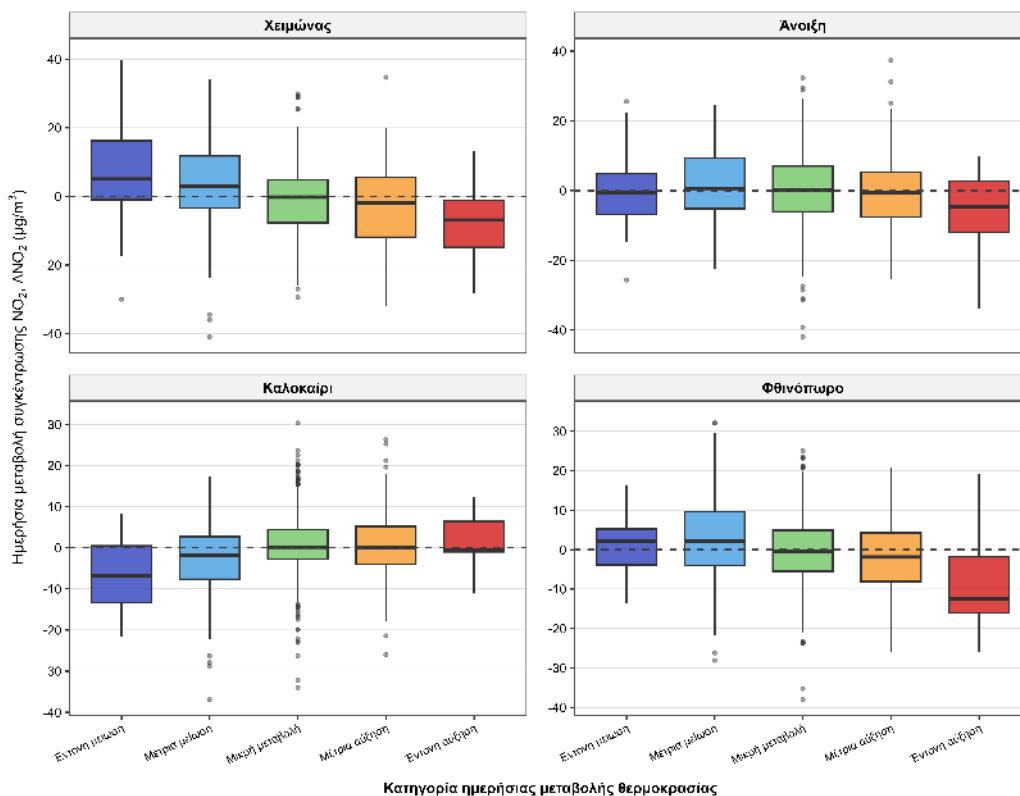
Σχήμα 4.38. Κατανομή της ημερήσιας μεταβολής της συγκέντρωσης NO_2 ανά κατηγορία ημερήσιας μεταβολής της μέσης θερμοκρασίας και εποχή στον σταθμό **Αριστοτέλους** κατά την περίοδο 2016–2024.



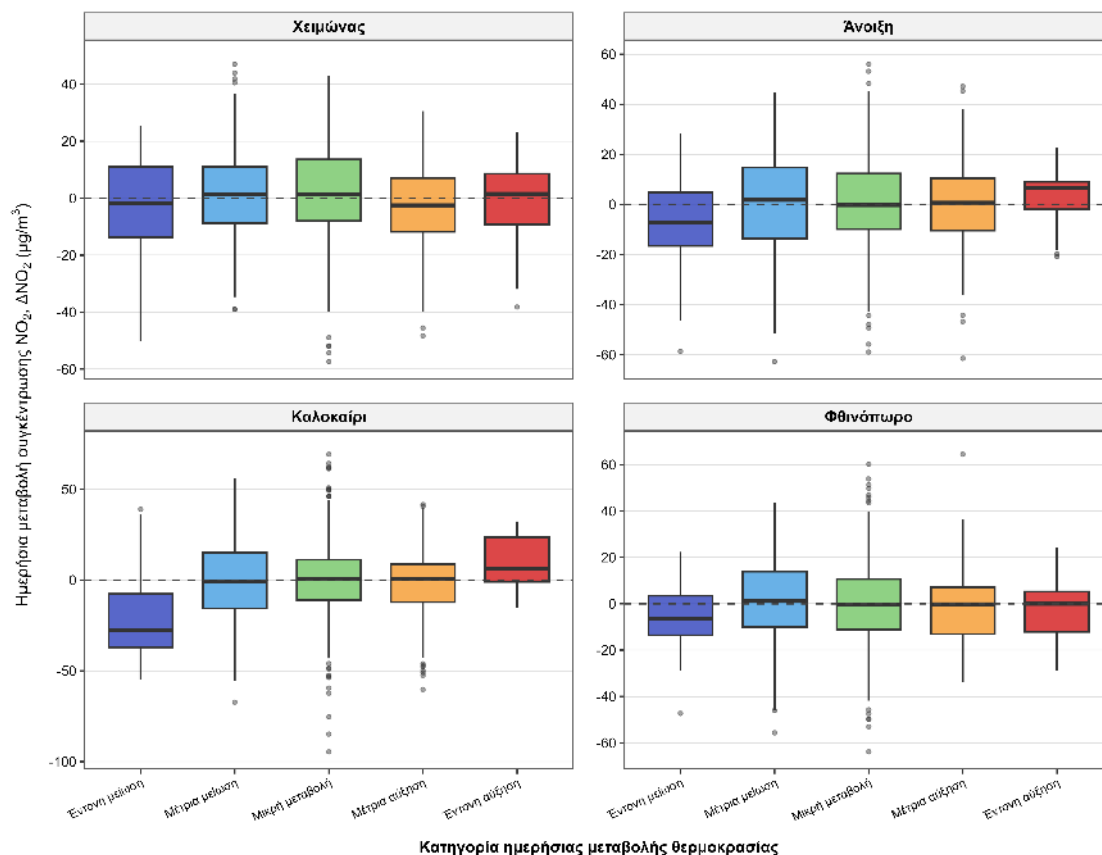
Σχήμα 4.39. Κατανομή της ημερήσιας μεταβολής της συγκέντρωσης NO_2 ανά κατηγορία ημερήσιας μεταβολής της μέσης θερμοκρασίας και εποχή στον **σταθμό Ελευσίνας** κατά την περίοδο 2016–2024.



Σχήμα 4.40. Κατανομή της ημερήσιας μεταβολής της συγκέντρωσης NO_2 ανά κατηγορία ημερήσιας μεταβολής της μέσης θερμοκρασίας και εποχή στον σταθμό **Θρακομακεδόνων** κατά την περίοδο 2016–2024.



Σχήμα 4.41. Κατανομή της ημερήσιας μεταβολής της συγκέντρωσης NO_2 ανά κατηγορία ημερήσιας μεταβολής της μέσης θερμοκρασίας και εποχή στον σταθμό **Λαυκόβρυσης** κατά την περίοδο 2016–2024.



Σχήμα 4.42. Κατανομή της ημερήσιας μεταβολής της συγκέντρωσης NO_2 ανά κατηγορία ημερήσιας μεταβολής της μέσης θερμοκρασίας και εποχή στον σταθμό **Πατησίων** κατά την περίοδο 2016–2024.

Σημείωση: Η κεντρική γραμμή κάθε πλαισίου αντιστοιχεί στη διάμεσο, το πλαίσιο στο ενδοτεταρτημοριακό εύρος, οι απολήξεις στο εύρος των τιμών εντός των απολήξεων και τα μεμονωμένα σημεία στις τιμές εκτός των απολήξεων. Η διακεκομμένη οριζόντια γραμμή αντιστοιχεί σε μηδενική ημερήσια μεταβολή της συγκέντρωσης NO_2 .

Η συγκριτική επισκόπηση των Σχημάτων 4.38–4.42 ανέδειξε χωρική και εποχική ετερογένεια στην κατανομή της ΔNO_2 . Σε ορισμένους συνδυασμούς σταθμού και εποχής διακρίνεται βαθμιαία μετατόπιση της διαμέσου κατά τη μετάβαση από τις κατηγορίες μείωσης προς τις κατηγορίες αύξησης της θερμοκρασίας. Σε άλλες περιπτώσεις, οι κατανομές επικαλύπτονται σε μεγάλο βαθμό και οι κυριότερες διαφορές εντοπίζονται στη διασπορά και στην παρουσία ακραίων ημερήσιων μεταβολών.

Στον σταθμό Αριστοτέλους, οι διάμεσοι της ΔNO_2 παρέμειναν κοντά στη μηδενική τιμή κατά τον χειμώνα και το φθινόπωρο, χωρίς σαφή μονοτονική μεταβολή μεταξύ των κατηγοριών ΔΤ. Αντίθετα, κατά την άνοιξη και κυρίως το καλοκαίρι διακρίνεται μετάβαση από αρνητικότερες τιμές στις κατηγορίες μείωσης της θερμοκρασίας προς θετικότερες τιμές στις κατηγορίες αύξησής της. Το πρότυπο αυτό συμφωνεί με τη θετική κατεύθυνση της γραμμικής σχέσης που καταγράφηκε για τις ίδιες εποχές στην προηγούμενη ανάλυση.

Στην Ελευσίνα, η σαφέστερη διαφοροποίηση εμφανίστηκε κατά τον χειμώνα. Οι διάμεσοι της ΔNO_2 μετατοπίστηκαν σταδιακά προς αρνητικότερες τιμές καθώς η ΔΤ μεταβαλλόταν από τις κατηγορίες μείωσης προς τις κατηγορίες αύξησης, με την κατηγορία της ισχυρής αύξησης να παρουσιάζει τη χαμηλότερη διάμεσο. Η ίδια κατεύθυνση ήταν ηπιότερη την άνοιξη. Κατά το καλοκαίρι και το φθινόπωρο οι κατανομές παρουσίασαν μεγαλύτερη επικάλυψη και λιγότερο συστηματική διαφοροποίηση της κεντρικής τάσης.

Στους Θρακομακεδόνες, οι χειμερινές, ανοιξιάτικες και φθινοπωρινές κατανομές εμφάνισαν τάση μετατόπισης προς αρνητικότερες τιμές ΔNO_2 στις κατηγορίες αύξησης της θερμοκρασίας. Η κατηγορία της ισχυρής αύξησης παρουσίασε γενικά χαμηλότερες διαμέσους από τις κατηγορίες μείωσης ή μικρής μεταβολής. Κατά το καλοκαίρι, αντίθετα, οι διαφορές ήταν περιορισμένες και η ισχυρή αύξηση της θερμοκρασίας συνοδεύτηκε από ελαφρώς θετικότερη διάμεσο.

Η Λυκόβρυση παρουσίασε την ευκρινέστερη διαβάθμιση μεταξύ των κατηγοριών. Κατά τον χειμώνα, οι διάμεσοι μετακινήθηκαν από θετικές τιμές στις κατηγορίες μείωσης της θερμοκρασίας προς αρνητικές τιμές στις κατηγορίες αύξησής της. Παρόμοια εικόνα καταγράφηκε το φθινόπωρο, με ιδιαίτερα αρνητική διάμεσο στην κατηγορία της ισχυρής αύξησης. Κατά το καλοκαίρι η κατεύθυνση αντιστράφηκε: η ισχυρή μείωση της θερμοκρασίας συνδέθηκε με αρνητικές μεταβολές του NO_2 , ενώ η ισχυρή αύξηση με θετικότερες τιμές ΔNO_2 . Η εποχική αυτή διαφοροποίηση είναι συνεπής με τα αποτελέσματα της γραμμικής παλινδρόμησης.

Στον σταθμό Πατησίων, οι κατανομές χαρακτηρίστηκαν από μεγαλύτερη διασπορά και εκτεταμένη επικάλυψη μεταξύ των κατηγοριών. Κατά τον χειμώνα και το φθινόπωρο δεν προέκυψε σαφής διαβάθμιση των διαμέσων. Κατά την άνοιξη και κυρίως το καλοκαίρι, ωστόσο, παρατηρήθηκε μετάβαση από αρνητικότερες τιμές στην κατηγορία της ισχυρής μείωσης προς θετικότερες τιμές στην κατηγορία της ισχυρής αύξησης. Η εικόνα αυτή

πρέπει να ερμηνεύεται με προσοχή, καθώς οι ενδιάμεσες κατανομές επικαλύπτονται σημαντικά.

Σε συνολικό επίπεδο, η Ελευσίνα, οι Θρακομακεδόνες και η Λυκόβρυση παρουσίασαν συχνότερα αρνητική μετατόπιση της ΔNO_2 στις κατηγορίες αύξησης της θερμοκρασίας, κυρίως τον χειμώνα και το φθινόπωρο. Αντίθετη κατεύθυνση διακρίθηκε κυρίως κατά το καλοκαίρι στην Αριστοτέλους, στη Λυκόβρυση και στην Πατησίων, όπου οι μεγαλύτερες αυξήσεις της θερμοκρασίας συνοδεύτηκαν από θετικότερες διάμεσες μεταβολές του NO_2 . Παρά τις επιμέρους διαφοροποιήσεις, η εκτεταμένη επικάλυψη των πλαισίων και των απολήξεων δείχνει ότι οι κατηγορίες της ΔT δεν διαχωρίζουν πλήρως τις κατανομές της ΔNO_2 . Επιπλέον, η παρουσία πολυάριθμων παρατηρήσεων εκτός των απολήξεων υποδηλώνει σημαντική ημερήσια μεταβλητότητα, η οποία δεν αποδίδεται αποκλειστικά στη μεταβολή της θερμοκρασίας. Τα ευρήματα είναι επομένως περιγραφικά και δεν τεκμηριώνουν από μόνα τους στατιστικά σημαντικές διαφορές μεταξύ των κατηγοριών. Συνολικά, προκύπτει εποχικά και χωρικά μεταβαλλόμενη συμπεριφορά, χωρίς ενιαίο πρότυπο που να ισχύει για όλους τους σταθμούς.

4.6.4 Συγκριτική παρουσίαση των αποτελεσμάτων για το NO_2

Για τη συνολική αποτίμηση της σχέσης μεταξύ θερμοκρασίας και διοξειδίου του αζώτου, τα αποτελέσματα των δύο αναλυτικών προσεγγίσεων παρουσιάζονται συγκεντρωτικά ανά σταθμό και εποχή. Η πρώτη προσέγγιση εξετάζει τη συνδιακύμανση των ημερήσιων μέσων επιπέδων θερμοκρασίας και NO_2 , ενώ η δεύτερη εστιάζει στις μεταβολές από τη μία ημέρα στην επόμενη. Η διάκριση αυτή είναι ουσιώδης, καθώς οι δύο αναλύσεις δεν αποτυπώνουν το ίδιο φαινόμενο: η πρώτη ενσωματώνει τη βραδύτερη χρονική και εποχική δομή των χρονοσειρών, ενώ η δεύτερη περιορίζει την επίδραση των επιπέδων και απομονώνει σε μεγαλύτερο βαθμό τη βραχυχρόνια συνδιακύμανση.

Για κάθε συνδυασμό σταθμού και εποχής παρουσιάζονται ο αριθμός των παρατηρήσεων, ο συντελεστής συσχέτισης Pearson, η κλίση της απλής γραμμικής παλινδρόμησης, το 95% διάστημα εμπιστοσύνης της κλίσης, η τιμή p και ο συντελεστής προσδιορισμού R^2 .

Τα συγκεντρωτικά αποτελέσματα παρατίθενται στους Πίνακες 4.6 και 4.7.

Πίνακας 4.6. Συγκεντρωτικά αποτελέσματα της απλής γραμμικής παλινδρόμησης μεταξύ της ημερήσιας μέσης θερμοκρασίας και της ημερήσιας μέσης συγκέντρωσης NO₂, ανά σταθμό μέτρησης και εποχή, κατά την περίοδο 2016–2024.

Σταθμός	Εποχή	n	r	β ₁	95% ΔΕ της β ₁	p	R ²
Αριστοτέλους	Χειμώνας	779	0,097	0,401	0,113 έως 0,690	0,006	0,010
Αριστοτέλους	Ανοιξη	779	0,154	0,532	0,292 έως 0,772	<0,001	0,024
Αριστοτέλους	Καλοκαίρι	676	0,138	0,658	0,300 έως 1,016	<0,001	0,019
Αριστοτέλους	Φθινόπωρο	661	0,152	0,453	0,228 έως 0,678	<0,001	0,023
Ελευσίνα	Χειμώνας	803	0,121	0,352	0,151 έως 0,553	<0,001	0,015
Ελευσίνα	Ανοιξη	820	0,081	0,185	0,030 έως 0,340	0,020	0,007
Ελευσίνα	Καλοκαίρι	751	0,111	0,384	0,137 έως 0,630	0,002	0,012
Ελευσίνα	Φθινόπωρο	787	-0,038	-0,080	-0,229 έως 0,068	0,289	0,001
Θρακομακεδόνες	Χειμώνας	697	0,119	0,207	0,078 έως 0,336	0,002	0,014
Θρακομακεδόνες	Ανοιξη	723	0,147	0,174	0,088 έως 0,259	<0,001	0,022
Θρακομακεδόνες	Καλοκαίρι	713	-0,061	-0,089	-0,196 έως 0,019	0,105	0,004
Θρακομακεδόνες	Φθινόπωρο	706	-0,014	-0,017	-0,104 έως 0,070	0,702	0,000
Λυκόβρυση	Χειμώνας	647	-0,057	-0,195	-0,459 έως 0,069	0,148	0,003
Λυκόβρυση	Ανοιξη	729	0,074	0,195	0,003 έως 0,386	0,046	0,005
Λυκόβρυση	Καλοκαίρι	786	0,102	0,346	0,108 έως 0,583	0,004	0,010
Λυκόβρυση	Φθινόπωρο	689	-0,057	-0,141	-0,326 έως 0,045	0,136	0,003
Πατήσια	Χειμώνας	786	0,091	0,444	0,102 έως 0,787	0,011	0,008
Πατήσια	Ανοιξη	784	0,328	1,700	1,357 έως 2,043	<0,001	0,108
Πατήσια	Καλοκαίρι	755	-0,047	-0,428	-1,075 έως 0,220	0,195	0,002
Πατήσια	Φθινόπωρο	745	0,390	1,860	1,544 έως 2,176	<0,001	0,152

Πίνακας 4.6. Συγκεντρωτικά αποτελέσματα της απλής γραμμικής παλινδρόμησης μεταξύ της ημερήσιας μέσης θερμοκρασίας και της ημερήσιας μέσης συγκέντρωσης NO₂, ανά σταθμό μέτρησης και εποχή, κατά την περίοδο 2016–2024.

Πίνακας 4.7. Συγκεντρωτικά αποτελέσματα της απλής γραμμικής παλινδρόμησης μεταξύ της ημερήσιας μεταβολής της μέσης θερμοκρασίας και της ημερήσιας μεταβολής της συγκέντρωσης NO_2 , ανά σταθμό μέτρησης και εποχή, κατά την περίοδο 2016–2024.

Σταθμός	Εποχή	n	r	β_1	95% ΔΕ της β_1	p	R^2
Αριστοτέλους	Χειμώνας	758	-0,013	-0,088	-0,586 έως 0,409	0,727	0,000
Αριστοτέλους	Ανοιξη	752	0,134	1,076	0,504 έως 1,647	<0,001	0,018
Αριστοτέλους	Καλοκαίρι	641	0,213	1,748	1,125 έως 2,371	<0,001	0,045
Αριστοτέλους	Φθινόπωρο	643	0,050	0,386	-0,209 έως 0,981	0,203	0,003
Ελευσίνα	Χειμώνας	798	-0,196	-0,943	-1,272 έως -0,614	<0,001	0,038
Ελευσίνα	Ανοιξη	816	-0,089	-0,515	-0,909 έως -0,120	0,011	0,008
Ελευσίνα	Καλοκαίρι	740	0,050	0,292	-0,131 έως 0,714	0,176	0,002
Ελευσίνα	Φθινόπωρο	779	-0,114	-0,629	-1,014 έως -0,243	0,001	0,013
Θρακομακεδόνες	Χειμώνας	688	-0,212	-0,600	-0,807 έως -0,392	<0,001	0,045
Θρακομακεδόνες	Ανοιξη	716	-0,077	-0,275	-0,535 έως -0,015	0,038	0,006
Θρακομακεδόνες	Καλοκαίρι	705	0,077	0,233	0,011 έως 0,454	0,040	0,006
Θρακομακεδόνες	Φθινόπωρο	699	-0,138	-0,434	-0,666 έως -0,203	<0,001	0,019
Λυκόβρυση	Χειμώνας	635	-0,335	-1,798	-2,192 έως -1,403	<0,001	0,112
Λυκόβρυση	Ανοιξη	715	-0,084	-0,552	-1,033 έως -0,071	0,025	0,007
Λυκόβρυση	Καλοκαίρι	768	0,180	1,117	0,683 έως 1,550	<0,001	0,032
Λυκόβρυση	Φθινόπωρο	675	-0,177	-1,117	-1,586 έως -0,647	<0,001	0,031
Πατήσια	Χειμώνας	766	-0,030	-0,258	-0,867 έως 0,351	0,405	0,001
Πατήσια	Ανοιξη	758	0,009	0,109	-0,750 έως 0,968	0,804	0,000
Πατήσια	Καλοκαίρι	720	0,025	0,414	-0,778 έως 1,606	0,496	0,001
Πατήσια	Φθινόπωρο	721	0,011	0,136	-0,731 έως 1,002	0,758	0,000

Πίνακας 4.7. Συγκεντρωτικά αποτελέσματα της απλής γραμμικής παλινδρόμησης μεταξύ της ημερήσιας μεταβολής της μέσης θερμοκρασίας και της ημερήσιας μεταβολής της συγκέντρωσης NO_2 , ανά σταθμό μέτρησης και εποχή, κατά την περίοδο 2016–2024.

Σημείωση: n = αριθμός παρατηρήσεων, r = συντελεστής συσχέτισης Pearson, β = κλίση της απλής γραμμικής παλινδρόμησης, 95% ΔΕ = 95% διάστημα εμπιστοσύνης της κλίσης, p = τιμή στατιστικής σημαντικότητας και R^2 = συντελεστής προσδιορισμού.

Η συνεξέταση των δύο πινάκων δείχνει ότι η σχέση θερμοκρασίας– NO_2 δεν μπορεί να περιγραφεί από ένα ενιαίο γραμμικό πρότυπο. Η κατεύθυνση και το μέγεθος των συσχετίσεων διαφοροποιήθηκαν τόσο χωρικά όσο και εποχικά, ενώ οι σχέσεις που εμφανίστηκαν στα ημερήσια μέσα επίπεδα δεν αναπαράχθηκαν κατ' ανάγκην όταν η ανάλυση μετατοπίστηκε στις ημερήσιες διαφορές. Η ασυμφωνία αυτή αποτελεί βασικό

εύρημα, διότι υποδηλώνει ότι μέρος των συσχετίσεων των ημερήσιων μέσων τιμών πιθανόν συνδέεται με κοινές χρονικές μεταβολές, χωρίς να αντανakλά αντίστοιχα ισχυρή απόκριση του NO₂ στις μεταβολές της θερμοκρασίας από ημέρα σε ημέρα.

Στην ανάλυση των ημερήσιων μέσων επιπέδων, ο σταθμός Πατησίων παρουσίασε το σαφέστερο θετικό σήμα. Οι υψηλότερες τιμές καταγράφηκαν το φθινόπωρο, με $r=0,390$ και $R^2=0,152$, και την άνοιξη, με $r=0,328$ και $R^2=0,108$. Οι αντίστοιχες κλίσεις, $\beta=1,860$ και $\beta=1,700 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ανά °C, δείχνουν ότι στα συγκεκριμένα εποχικά υποσύνολα οι υψηλότερες θερμοκρασίες συνυπήρχαν με υψηλότερες συγκεντρώσεις NO₂. Παρά τη συγκριτικά μεγαλύτερη ένταση των σχέσεων, το μεγαλύτερο μέρος της μεταβλητότητας παρέμενε ανεξήγητο, καθώς ακόμη και η μέγιστη τιμή του R^2 δεν υπερέβη το 0,152.

Στους υπόλοιπους σταθμούς, οι συσχετίσεις των ημερήσιων μέσων τιμών ήταν κατά κανόνα πολύ ασθενείς. Στην Αριστοτέλους διατηρήθηκε θετική κατεύθυνση σε όλες τις εποχές, αλλά με R^2 μεταξύ 0,010 και 0,024. Στην Ελευσίνα και στους Θρακομακεδόνες οι θετικές σχέσεις περιορίστηκαν κυρίως στον χειμώνα και την άνοιξη, ενώ κατά το φθινόπωρο και, σε ορισμένες περιπτώσεις, το καλοκαίρι, η κατεύθυνση εξασθένησε ή αντιστράφηκε. Στη Λυκόβρυση δεν παρατηρήθηκε σταθερή εποχική συνέπεια, καθώς οι θετικές σχέσεις της άνοιξης και του καλοκαιριού συνυπήρχαν με αρνητικές, αλλά μη στατιστικά σημαντικές, σχέσεις τον χειμώνα και το φθινόπωρο. Το σύνολο αυτών των αποτελεσμάτων δείχνει ότι οι απόλυτες ημερήσιες τιμές θερμοκρασίας και NO₂ δεν μεταβάλλονταν με τον ίδιο τρόπο σε όλες τις θέσεις. Η εικόνα διαφοροποιήθηκε αισθητά στην ανάλυση των ημερήσιων μεταβολών. Η εντονότερη σχέση καταγράφηκε στη Λυκόβρυση κατά τον χειμώνα, με $r=-0,335$, $\beta=-1,798$ και $R^2=0,112$. Η αρνητική κλίση δείχνει ότι ημέρες με αύξηση της θερμοκρασίας έτειναν να συνοδεύονται από μείωση του NO₂ σε σχέση με την προηγούμενη ημέρα. Η ίδια κατεύθυνση διατηρήθηκε, σε μικρότερο βαθμό, την άνοιξη και το φθινόπωρο, ενώ το καλοκαίρι αντιστράφηκε και καταγράφηκε θετική συσχέτιση. Η εποχική αυτή αντιστροφή υποδηλώνει ότι η βραχυχρόνια σχέση δεν είναι σταθερή, αλλά μεταβάλλεται ανάλογα με το επικρατούν μετεωρολογικό και φωτοχημικό καθεστώς.

Αρνητική βραχυχρόνια συνδιακύμανση εμφανίστηκε επίσης στην Ελευσίνα και στους Θρακομακεδόνες, κυρίως κατά τον χειμώνα και το φθινόπωρο. Αντίθετα, στην Αριστοτέλους θετικές σχέσεις καταγράφηκαν την άνοιξη και ιδιαίτερα το καλοκαίρι, με τη θερινή συσχέτιση να ανέρχεται σε $r=0,213$ και $R^2=0,045$. Επομένως, ακόμη και όταν εξετάστηκαν οι πρώτες διαφορές, δεν προέκυψε κοινή κατεύθυνση για το σύνολο των σταθμών.

Ο σταθμός Πατησίων παρουσίασε την πιο χαρακτηριστική απόκλιση μεταξύ των δύο αναλυτικών προσεγγίσεων. Ενώ στην ανάλυση των ημερήσιων μέσων τιμών καταγράφηκαν οι εντονότερες θετικές σχέσεις της ενότητας, στην ανάλυση των ημερήσιων μεταβολών οι συσχετίσεις ήταν πρακτικά μηδενικές σε όλες τις εποχές, με R^2 από 0,000 έως 0,001. Το εύρημα αυτό δείχνει ότι η θετική συνδιακύμανση των ημερήσιων επιπέδων θερμοκρασίας και NO_2 δεν συνοδευόταν από αντίστοιχη συνδιακύμανση των μεταβολών τους. Κατά συνέπεια, η σχέση των απόλυτων επιπέδων στον συγκεκριμένο σταθμό είναι πιθανό να επηρεάζεται από κοινά εποχικά χαρακτηριστικά, μεταβολές των εκπομπών ή άλλους χρονικά δομημένους παράγοντες.

Η μέγιστη τιμή του R^2 ήταν 0,152 στην ανάλυση των ημερήσιων μέσων τιμών και 0,112 στην ανάλυση των ημερήσιων μεταβολών. Οι τιμές αυτές δεν πρέπει να συγκρίνονται ως απολύτως ισοδύναμα μέτρα, καθώς προέρχονται από διαφορετικές εξαρτημένες μεταβλητές. Ωστόσο, και στις δύο περιπτώσεις δείχνουν ότι η θερμοκρασία απέδωσε περιορισμένο ποσοστό της μεταβλητότητας του NO_2 . Η πλειονότητα των μοντέλων παρουσίασε R^2 σαφώς χαμηλότερο από 0,05, γεγονός που περιορίζει την προβλεπτική και ερμηνευτική τους ισχύ.

Παράλληλα, η ύπαρξη στατιστικά σημαντικών αποτελεσμάτων σε αρκετούς συνδυασμούς δεν αναιρεί την ασθενή ένταση των σχέσεων. Το μεγάλο μέγεθος των δειγμάτων αυξάνει την πιθανότητα ανίχνευσης μικρών αποκλίσεων από τη μηδενική κλίση, χωρίς αυτό να συνεπάγεται ισχυρή περιβαλλοντική σύνδεση. Για τον λόγο αυτό, η ερμηνεία πρέπει να βασίζεται ταυτόχρονα στις τιμές r , β και R^2 και όχι μόνο στην τιμή p .

Συνολικά, τα αποτελέσματα καταδεικνύουν ότι η θερμοκρασία δεν αποτελεί αυτοτελή και σταθερό γραμμικό προσδιοριστικό παράγοντα των συγκεντρώσεων NO_2 . Η διαφορετική συμπεριφορά των ημερήσιων επιπέδων και των ημερήσιων μεταβολών, η αλλαγή της κατεύθυνσης μεταξύ εποχών και η έντονη διαφοροποίηση μεταξύ σταθμών υποδηλώνουν ότι η παρατηρούμενη σχέση διαμορφώνεται μέσα σε ένα πολυπαραγοντικό σύστημα. Οι τοπικές εκπομπές, η κυκλοφορία, η κατακόρυφη ανάμιξη της ατμόσφαιρας, η ταχύτητα και η διεύθυνση του ανέμου, η φωτοχημική δραστηριότητα και η εποχική μεταβολή του οριακού στρώματος είναι πιθανό να αλληλεπιδρούν με τη θερμοκρασία και να μεταβάλλουν το τελικό πρότυπο ανά θέση και εποχή. Επομένως, τα αποτελέσματα τεκμηριώνουν χωρική και εποχική ετερογένεια, αλλά όχι ενιαία ή αιτιώδη γραμμική σχέση μεταξύ θερμοκρασίας και NO_2 .

4.7 Σχέση θερμοκρασίας και όζοντος (O_3)

Η σχέση μεταξύ της θερμοκρασίας και της συγκέντρωσης όζοντος (O_3) εξετάστηκε σε δύο διακριτές χρονικές κλίμακες. Στην πρώτη προσέγγιση διερευνήθηκε η συσχέτιση μεταξύ της ημερήσιας μέσης θερμοκρασίας και της αντίστοιχης ημερήσιας μέσης συγκέντρωσης O_3 , με στόχο την αποτύπωση του τρόπου με τον οποίο τα επίπεδα των δύο μεταβλητών συνδέονται εντός κάθε εποχής. Στη δεύτερη προσέγγιση αναλύθηκαν οι ημερήσιες μεταβολές τους, ώστε να εξεταστεί κατά πόσο οι βραχυχρόνιες μεταβολές της θερμοκρασίας συνοδεύονται από αντίστοιχες μεταβολές στη συγκέντρωση του O_3 από τη μία ημέρα στην επόμενη. Οι αναλύσεις πραγματοποιήθηκαν χωριστά ανά εποχή και σταθμό μέτρησης και βασίστηκαν αποκλειστικά σε κοινές έγκυρες ημερήσιες παρατηρήσεις θερμοκρασίας και O_3 . Για την ανάλυση των ημερήσιων μεταβολών χρησιμοποιήθηκαν μόνο ζεύγη πραγματικά διαδοχικών ημερομηνιών, ώστε οι υπολογιζόμενες διαφορές να αντανακλούν γνήσια ημερήσια μεταβολή και να μην επηρεάζονται από κενά στις χρονοσειρές.

4.7.1 Σχέση ημερήσιας μέσης θερμοκρασίας και ημερήσιας συγκέντρωσης O_3 ανά εποχή και σταθμό

Η σχέση μεταξύ της ημερήσιας μέσης θερμοκρασίας και της ημερήσιας μέσης συγκέντρωσης O_3 εξετάστηκε χωριστά για κάθε εποχή και σταθμό μέτρησης, χρησιμοποιώντας αποκλειστικά τις ημέρες για τις οποίες υπήρχαν ταυτόχρονα έγκυρες παρατηρήσεις και για τις δύο μεταβλητές.

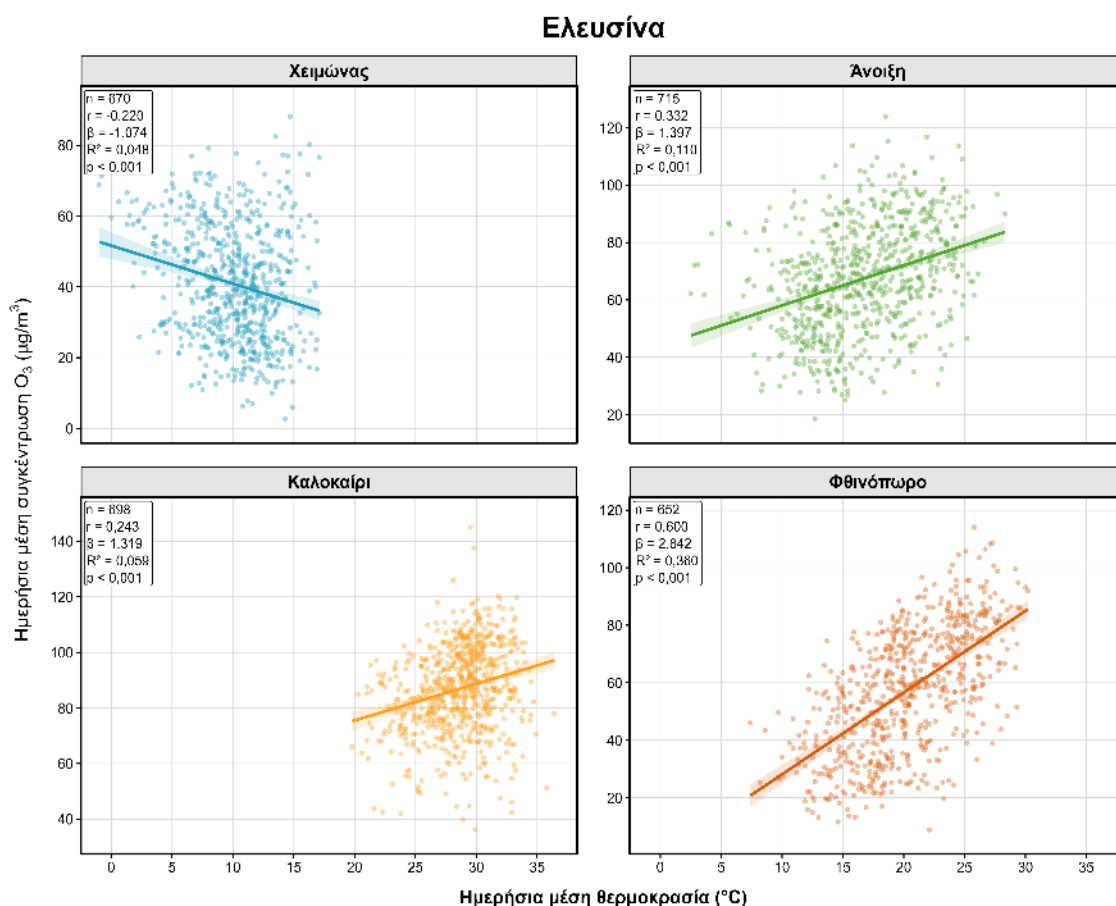
Για κάθε συνδυασμό εποχής και σταθμού εφαρμόστηκε απλό γραμμικό μοντέλο παλινδρόμησης, με σκοπό την εκτίμηση της κατεύθυνσης, του μεγέθους και της ερμηνευτικής ικανότητας της γραμμικής σχέσης.

Για κάθε επιμέρους μοντέλο υπολογίστηκαν ο αριθμός των κοινών παρατηρήσεων, ο συντελεστής γραμμικής συσχέτισης Pearson r , η μη τυποποιημένη κλίση της παλινδρόμησης β , το 95% διάστημα εμπιστοσύνης της κλίσης, η τιμή p και ο συντελεστής προσδιορισμού R^2 . Η κλίση β εκφράζει την εκτιμώμενη μεταβολή της ημερήσιας

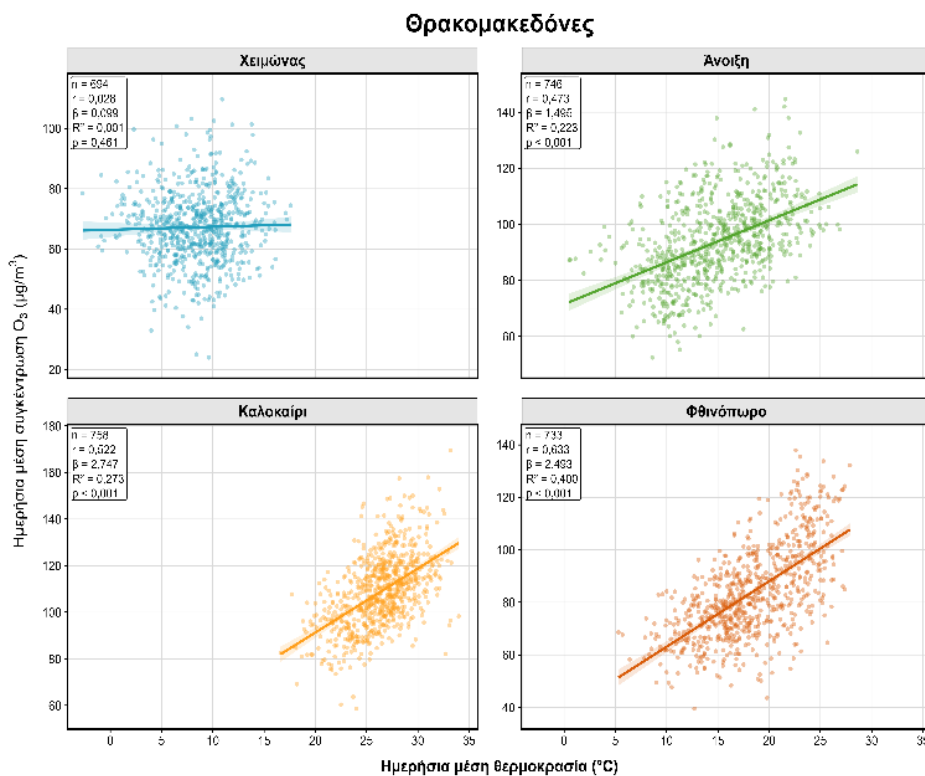
συγκέντρωσης O_3 , σε $\mu g/m^3$, η οποία αντιστοιχεί σε αύξηση της ημερήσιας μέσης θερμοκρασίας κατά $1^\circ C$.

Στα διαγράμματα παρουσιάζονται οι ημερήσιες παρατηρήσεις, η εκτιμώμενη γραμμή παλινδρόμησης, το αντίστοιχο διάστημα εμπιστοσύνης 95% και τα βασικά στατιστικά μεγέθη κάθε μοντέλου.

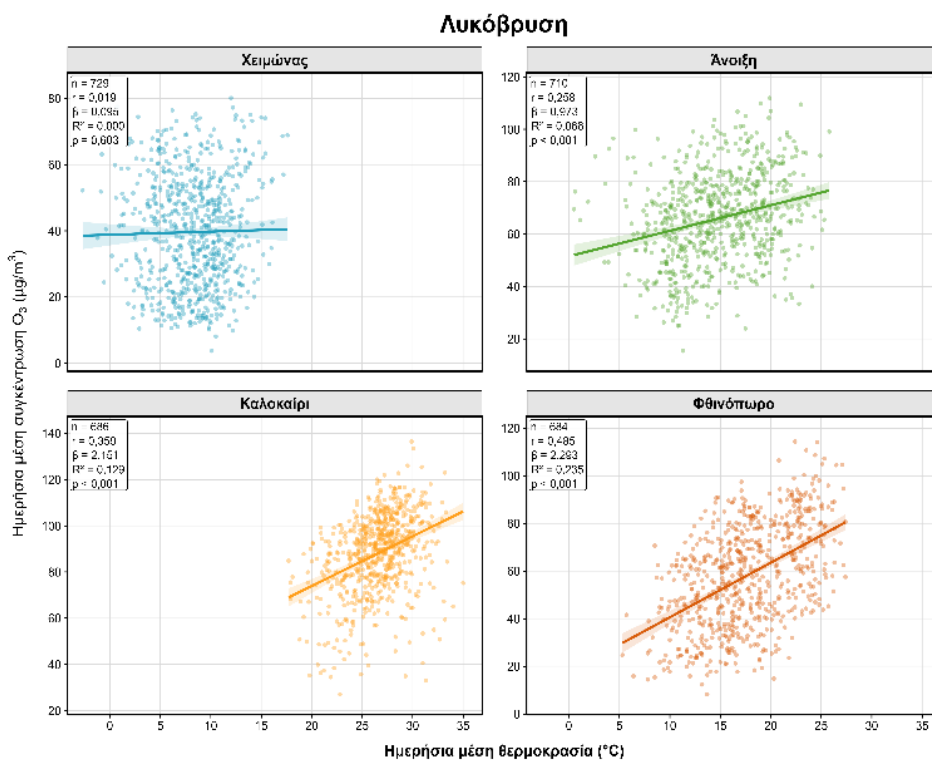
Τα αποτελέσματα απεικονίζονται στα Σχήματα 4.43–4.46.



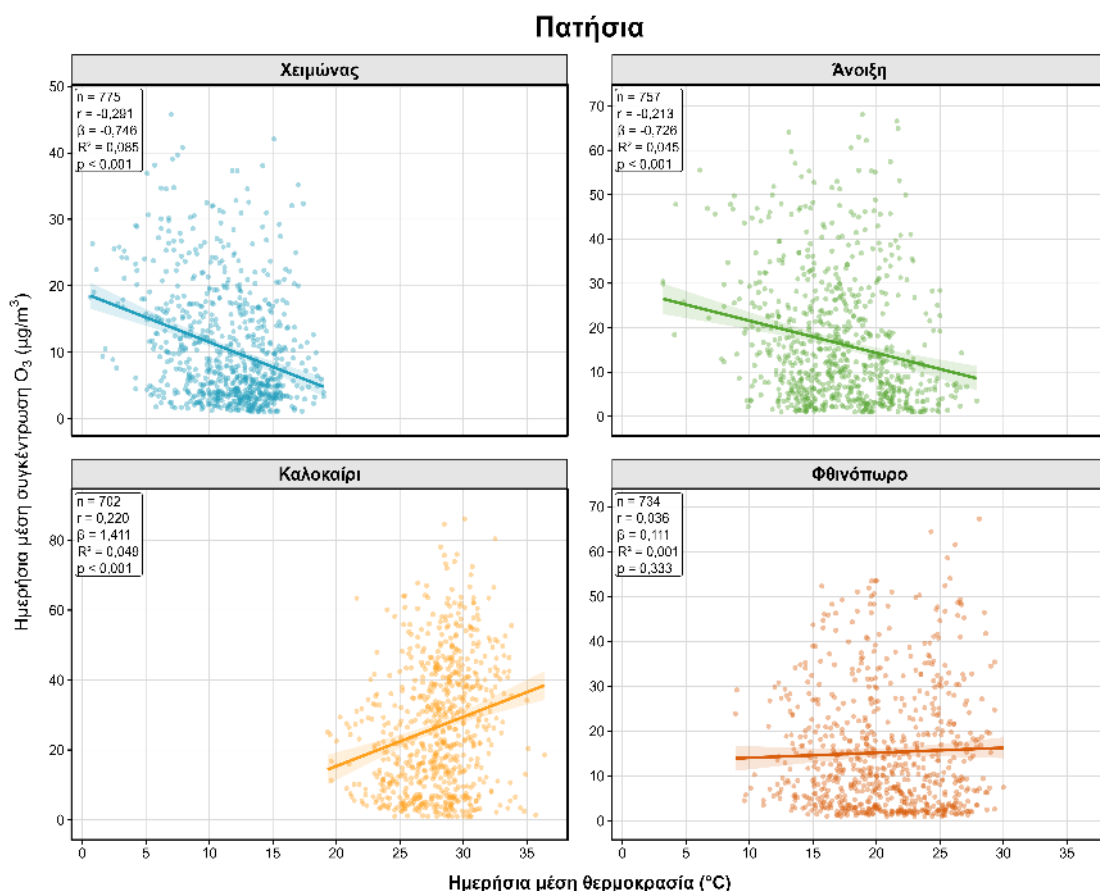
Σχήμα 4.43. Σχέση μεταξύ της ημερήσιας μέσης θερμοκρασίας και της ημερήσιας μέσης συγκέντρωσης O_3 ανά εποχή στον **σταθμό Ελευσίνας** κατά την περίοδο 2016–2024.



Σχήμα 4.44. Σχέση μεταξύ της ημερήσιας μέσης θερμοκρασίας και της ημερήσιας μέσης συγκέντρωσης O_3 ανά εποχή στον **σταθμό Θρακομακεδόνων** κατά την περίοδο 2016–2024.



Σχήμα 4.45. Σχέση μεταξύ της ημερήσιας μέσης θερμοκρασίας και της ημερήσιας μέσης συγκέντρωσης O_3 ανά εποχή στον **σταθμό Λυκόβρυσης** κατά την περίοδο 2016–2024.



Σχήμα 4.46. Σχέση μεταξύ της ημερήσιας μέσης θερμοκρασίας και της ημερήσιας μέσης συγκέντρωσης O₃ ανά εποχή στον **σταθμό Πατησίων** κατά την περίοδο 2016–2024.

Η ανάλυση των Σχημάτων 4.43–4.46 ανέδειξε σαφή εποχική και χωρική ετερογένεια στη σχέση μεταξύ της ημερήσιας μέσης θερμοκρασίας και της συγκέντρωσης O₃. Στην πλειονότητα των σταθμών, η σχέση ήταν θετική κατά την άνοιξη, το καλοκαίρι και το φθινόπωρο, ενώ κατά τον χειμώνα παρουσίασε διαφορετική κατεύθυνση ή ήταν ουσιαστικά ανύπαρκτη. Το αποτέλεσμα αυτό δείχνει ότι η σύνδεση θερμοκρασίας–O₃ δεν μπορεί να περιγραφεί από ένα ενιαίο γραμμικό πρότυπο για όλες τις εποχές και τις θέσεις μέτρησης. Στην Ελευσίνα καταγράφηκε ασθενής αρνητική σχέση κατά τον χειμώνα, με $r=-0,220$, $\beta=-1,074$, $R^2=0,048$ και $p<0,001$. Επομένως, στο πλαίσιο του αντίστοιχου μοντέλου, αύξηση της θερμοκρασίας κατά 1 °C συνδεόταν με εκτιμώμενη μείωση της συγκέντρωσης O₃ κατά 1,074 μg/m³. Κατά την άνοιξη η κατεύθυνση αντιστράφηκε και καταγράφηκε

θετική σχέση μέτριου μεγέθους ($r=0,332$, $\beta=1,397$, $R^2=0,110$, $p<0,001$). Το καλοκαίρι η θετική συσχέτιση ήταν ασθενέστερη ($r=0,243$, $R^2=0,059$), ενώ το φθινόπωρο εμφανίστηκε η ισχυρότερη σχέση του σταθμού, με $r=0,600$, $\beta=2,842$, $R^2=0,360$ και $p<0,001$. Το φθινοπωρινό μοντέλο απέδωσε το 36,0% της παρατηρούμενης μεταβλητότητας του O_3 , ποσοστό αισθητά υψηλότερο από εκείνο των υπόλοιπων εποχών.

Στους Θρακομακεδόνες η χειμερινή σχέση ήταν πρακτικά μηδενική και μη στατιστικά σημαντική ($r=0,028$, $R^2=0,001$, $p=0,461$). Αντίθετα, κατά την άνοιξη, το καλοκαίρι και το φθινόπωρο καταγράφηκαν θετικές και στατιστικά σημαντικές σχέσεις. Την άνοιξη προέκυψαν $r=0,473$, $\beta=1,495$ και $R^2=0,223$, ενώ το καλοκαίρι η σχέση ενισχύθηκε περαιτέρω ($r=0,522$, $\beta=2,747$, $R^2=0,273$). Η υψηλότερη ερμηνευτική ικανότητα παρατηρήθηκε το φθινόπωρο, με $r=0,633$, $\beta=2,493$, $R^2=0,400$ και $p<0,001$. Συνεπώς, κατά τη συγκεκριμένη εποχή, η θερμοκρασία απέδωσε το 40,0% της μεταβλητότητας της ημερήσιας συγκέντρωσης O_3 , που αποτελεί τη μεγαλύτερη τιμή R^2 μεταξύ όλων των εξεταζόμενων συνδυασμών.

Στη Λυκόβρυση δεν διαπιστώθηκε ουσιαστική γραμμική σχέση κατά τον χειμώνα ($r=0,019$, $R^2<0,001$, $p=0,603$). Κατά την άνοιξη παρατηρήθηκε ασθενής θετική συσχέτιση ($r=0,258$, $\beta=0,973$, $R^2=0,066$), η οποία ενισχύθηκε το καλοκαίρι ($r=0,359$, $\beta=2,151$, $R^2=0,129$). Το φθινόπωρο η θετική σχέση ήταν ακόμη εντονότερη, με $r=0,485$, $\beta=2,293$, $R^2=0,235$ και $p<0,001$. Τα αποτελέσματα υποδηλώνουν ότι η γραμμική σύνδεση θερμοκρασίας- O_3 στον συγκεκριμένο σταθμό ενισχυόταν από την άνοιξη προς το φθινόπωρο, χωρίς όμως να εμφανίζεται κατά τη χειμερινή περίοδο.

Ο σταθμός Πατησίων παρουσίασε διαφορετικό εποχικό πρότυπο. Κατά τον χειμώνα καταγράφηκε ασθενής αρνητική σχέση ($r=-0,291$, $\beta=-0,746$, $R^2=0,085$, $p<0,001$), ενώ αρνητική παρέμεινε η σχέση και την άνοιξη ($r=-0,213$, $\beta=-0,726$, $R^2=0,045$, $p<0,001$). Κατά το καλοκαίρι η κατεύθυνση αντιστράφηκε και προέκυψε ασθενής θετική συσχέτιση ($r=0,220$, $\beta=1,411$, $R^2=0,049$, $p<0,001$). Το φθινόπωρο, αντίθετα, η σχέση ήταν σχεδόν μηδενική και μη στατιστικά σημαντική ($r=0,036$, $R^2=0,001$, $p=0,333$). Παράλληλα, οι συγκεντρώσεις O_3 στον σταθμό Πατησίων παρέμειναν γενικά χαμηλότερες από εκείνες των άλλων σταθμών, με μεγάλο αριθμό παρατηρήσεων να συγκεντρώνεται κοντά στις χαμηλές τιμές.

Η σύγκριση των σταθμών αναδεικνύει ένα συχνότερο θετικό πρότυπο κατά τις θερμότερες εποχές, το οποίο ήταν ιδιαίτερα σαφές στους Θρακομακεδόνες και στη Λυκόβρυση. Κατά

το καλοκαίρι θετικές σχέσεις καταγράφηκαν και στους τέσσερις σταθμούς, αν και οι τιμές του R^2 κυμάνθηκαν από 0,049 στην Πατησίων έως 0,273 στους Θρακομακεδόνες. Το φθινόπωρο παρατηρήθηκαν οι ισχυρότερες θετικές σχέσεις στην Ελευσίνα και στους Θρακομακεδόνες, με $R^2=0,360$ και $R^2=0,400$, αντίστοιχα.

Η χειμερινή περίοδος παρουσίασε σαφώς πιο ανομοιογενή συμπεριφορά. Στην Ελευσίνα και στην Πατησίων οι σχέσεις ήταν αρνητικές, ενώ στους Θρακομακεδόνες και στη Λυκόβρυση ήταν σχεδόν μηδενικές. Η διαφοροποίηση αυτή δείχνει ότι η θερμοκρασία δεν συνδέεται με τη συγκέντρωση O_3 με τον ίδιο τρόπο υπό τις ψυχρές εποχικές συνθήκες και ότι η σχέση ενδέχεται να εξαρτάται περισσότερο από τα ιδιαίτερα χαρακτηριστικά κάθε θέσης.

Συνολικά, τα αποτελέσματα παρέχουν ισχυρότερη ένδειξη θετικής γραμμικής σύνδεσης μεταξύ θερμοκρασίας και O_3 κατά την άνοιξη, το καλοκαίρι και κυρίως το φθινόπωρο σε ορισμένους σταθμούς. Σε αντίθεση με τις προηγούμενες αναλύσεις για το NO και το NO_2 , αρκετά μοντέλα παρουσίασαν αισθητά υψηλότερες τιμές R^2 , ιδίως στους Θρακομακεδόνες και στην Ελευσίνα κατά το φθινόπωρο. Ωστόσο, ούτε στην περίπτωση του O_3 προέκυψε πλήρως ομοιόμορφο χωρικό και εποχικό πρότυπο. Επιπλέον, οι παρατηρούμενες συσχετίσεις δεν τεκμηριώνουν αιτιώδη επίδραση της θερμοκρασίας, καθώς η συγκέντρωση του O_3 επηρεάζεται και από τη διαθεσιμότητα πρόδρομων ενώσεων, την ηλιακή ακτινοβολία, τη φωτοχημική δραστηριότητα, τη μεταφορά αέριων μαζών και τις συνθήκες ατμοσφαιρικής ανάμιξης.

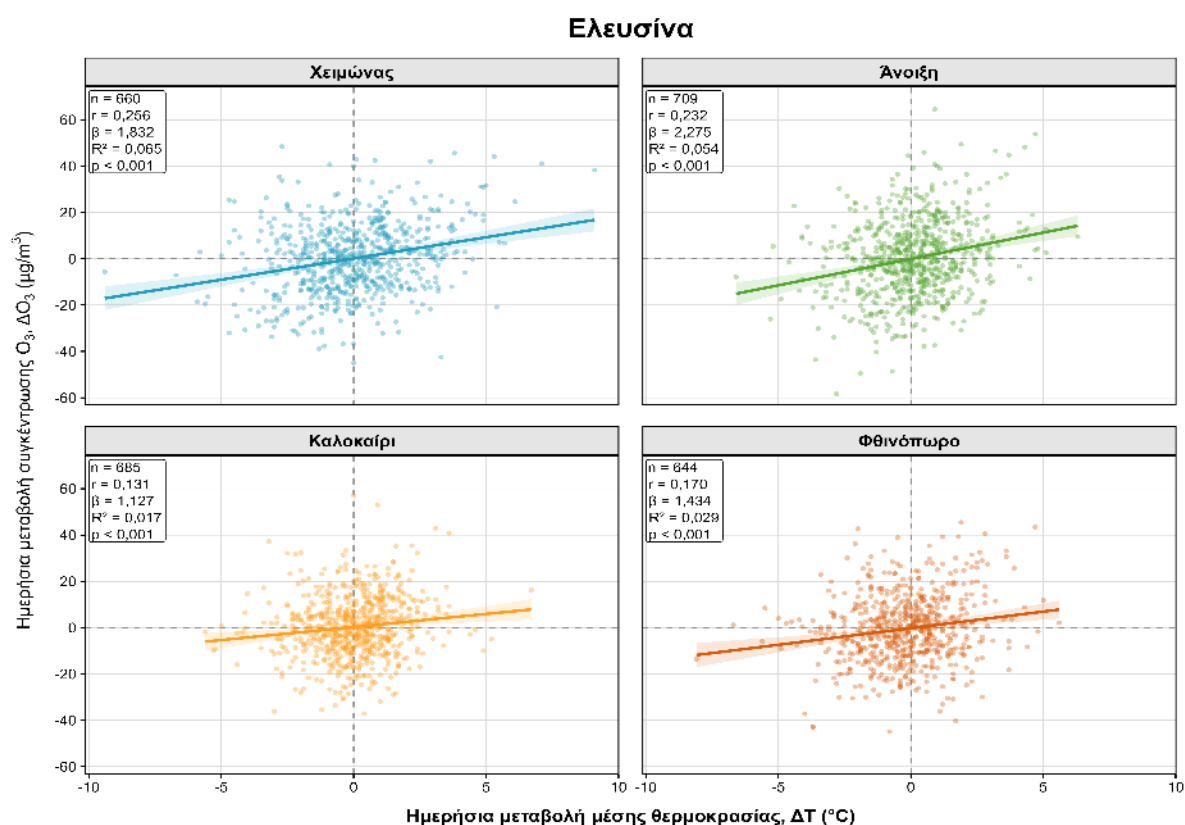
4.7.2 Σχέση ημερήσιας μεταβολής της θερμοκρασίας και ημερήσιας μεταβολής της συγκέντρωσης O_3 ανά εποχή και σταθμό

Για την αποτίμηση της βραχυχρόνιας συνδιακύμανσης της θερμοκρασίας και του O_3 αναλύθηκαν οι μεταβολές τους μεταξύ διαδοχικών ημερών. Η ημερήσια μεταβολή κάθε μεταβλητής υπολογίστηκε ως η διαφορά της τιμής μιας ημέρας από την αντίστοιχη τιμή της αμέσως προηγούμενης ημερολογιακής ημέρας. Στην ανάλυση διατηρήθηκαν μόνο ζεύγη πραγματικά διαδοχικών ημερομηνιών με ταυτόχρονα έγκυρες παρατηρήσεις θερμοκρασίας και O_3 , ώστε οι υπολογισμένες διαφορές να μην επηρεάζονται από χρονικά κενά στις χρονοσειρές.

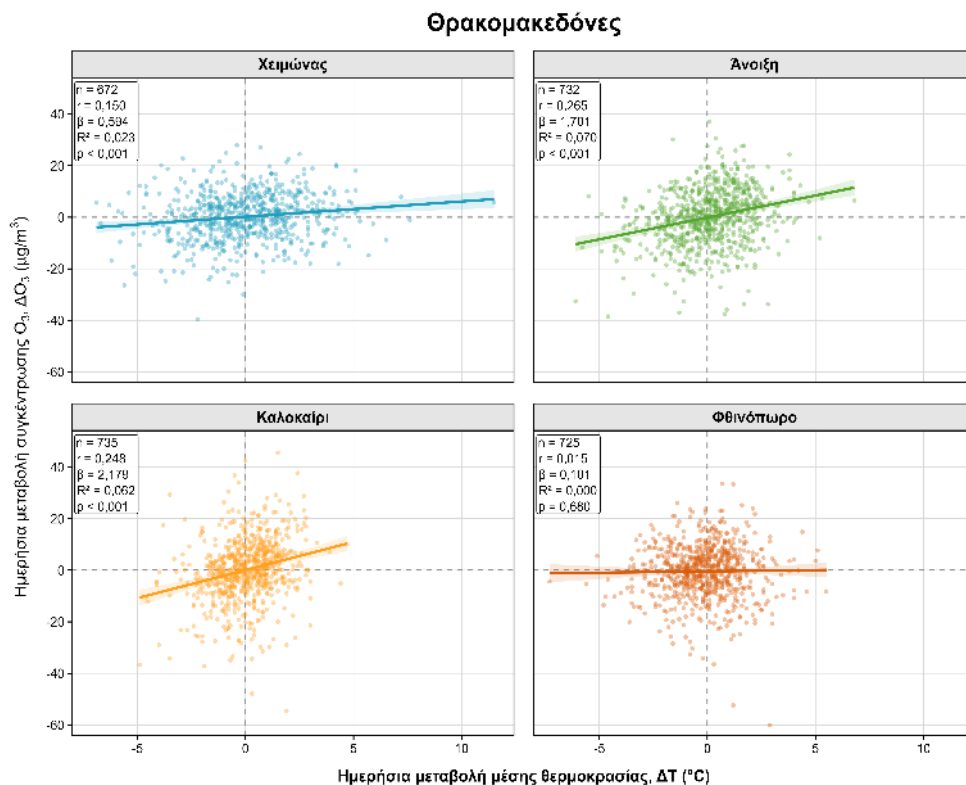
Η σχέση μεταξύ της ημερήσιας μεταβολής της μέσης θερμοκρασίας, ΔT , και της ημερήσιας μεταβολής της συγκέντρωσης O_3 , ΔO_3 , εκτιμήθηκε χωριστά ανά εποχή και σταθμό μέσω απλού γραμμικού μοντέλου παλινδρόμησης.

Για κάθε επιμέρους μοντέλο υπολογίστηκαν ο αριθμός των έγκυρων ζευγών παρατηρήσεων, ο συντελεστής γραμμικής συσχέτισης Pearson r , η μη τυποποιημένη κλίση β , το 95% διάστημα εμπιστοσύνης της κλίσης, η τιμή p και ο συντελεστής προσδιορισμού R^2 . Η κλίση β εκφράζει την εκτιμώμενη μεταβολή της ΔO_3 , σε $\mu g/m^3$, η οποία αντιστοιχεί σε αύξηση της ΔT κατά $1^\circ C$.

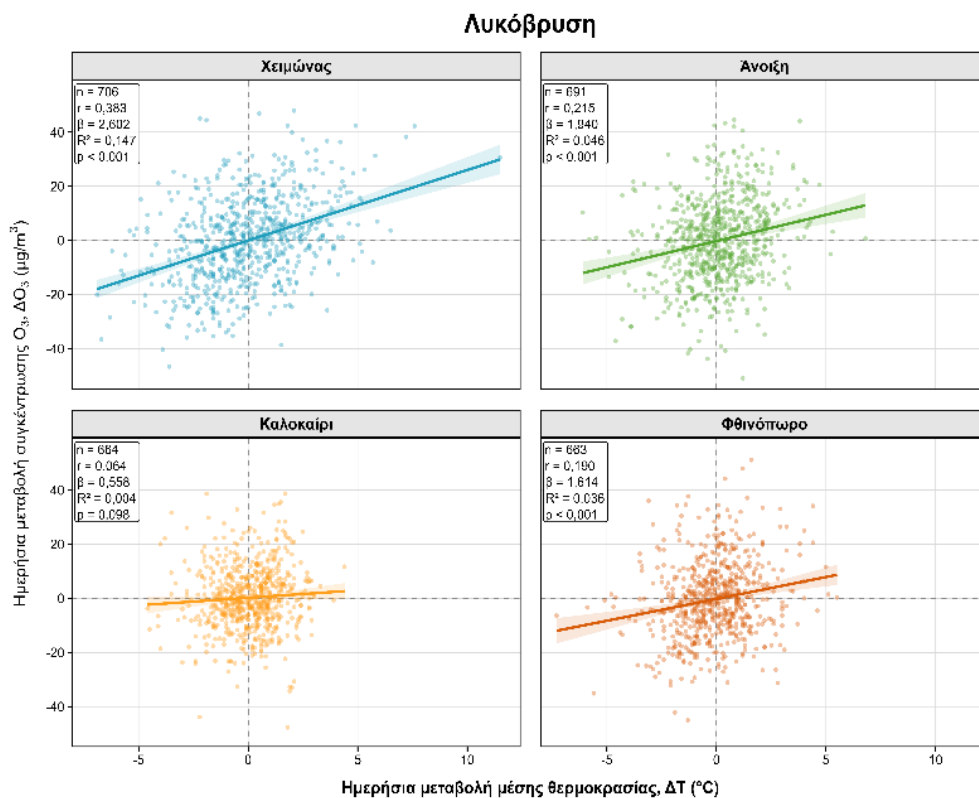
Τα αποτελέσματα παρουσιάζονται στα Σχήματα 4.47–4.50.



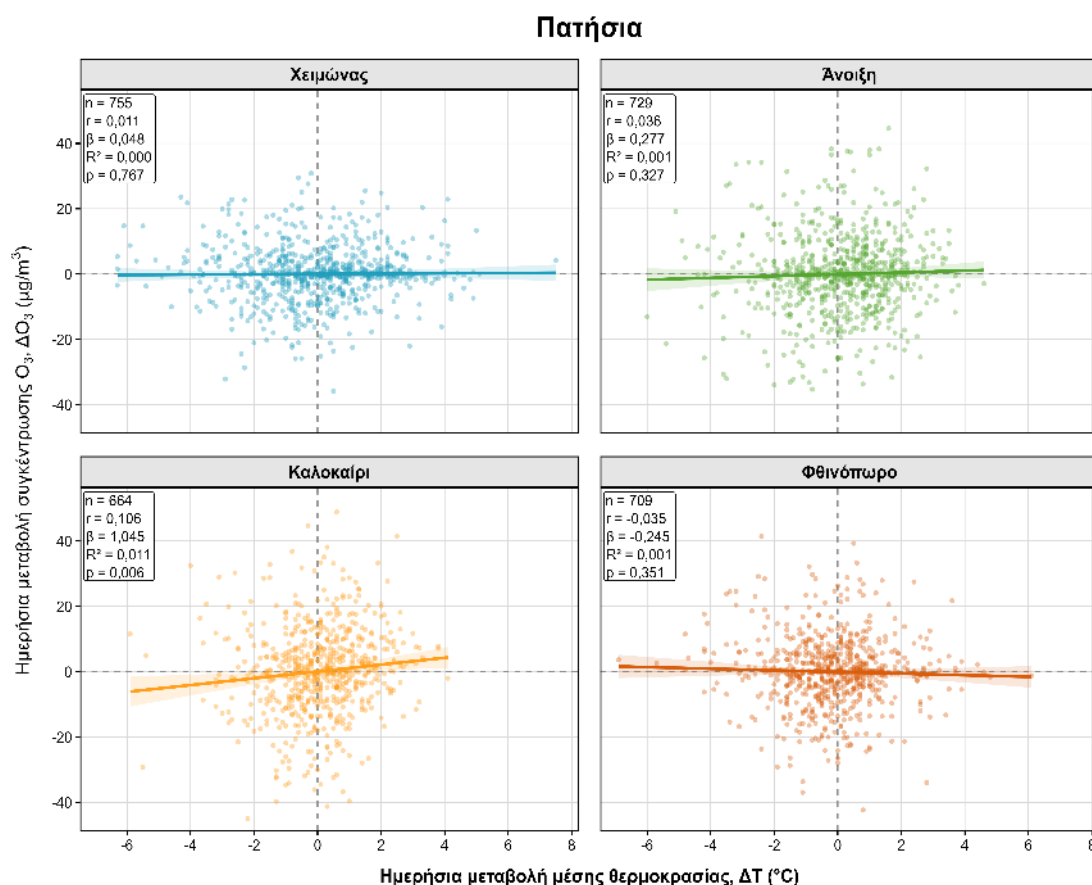
Σχήμα 4.47. Σχέση μεταξύ της ημερήσιας μεταβολής της μέσης θερμοκρασίας και της ημερήσιας μεταβολής της συγκέντρωσης O_3 ανά εποχή στον **σταθμό Ελευσίνας** κατά την περίοδο 2016–2024.



Σχήμα 4.48. Σχέση μεταξύ της ημερήσιας μεταβολής της μέσης θερμοκρασίας και της ημερήσιας μεταβολής της συγκέντρωσης O_3 ανά εποχή στον **σταθμό Θρακομακεδόνων** κατά την περίοδο 2016–2024.



Σχήμα 4.49. Σχέση μεταξύ της ημερήσιας μεταβολής της μέσης θερμοκρασίας και της ημερήσιας μεταβολής της συγκέντρωσης O_3 ανά εποχή στον **σταθμό Λυκόβρυσης** κατά την περίοδο 2016–2024.



Σχήμα 4.50. Σχέση μεταξύ της ημερήσιας μεταβολής της μέσης θερμοκρασίας και της ημερήσιας μεταβολής της συγκέντρωσης O₃ ανά εποχή στον **σταθμό Πατησίων** κατά την περίοδο 2016–2024.

Στην Ελευσίνα, η σχέση μεταξύ ΔT και ΔO₃ ήταν θετική και στατιστικά σημαντική σε όλες τις εποχές. Η ισχυρότερη συσχέτιση καταγράφηκε τον χειμώνα, με $r=0,256$, $\beta=1,832$, $R^2=0,065$ και $p<0,001$. Θετική σχέση εμφανίστηκε και την άνοιξη ($r=0,232$, $\beta=2,275$, $R^2=0,054$, $p<0,001$), ενώ το καλοκαίρι ($r=0,131$, $R^2=0,017$) και το φθινόπωρο ($r=0,170$, $R^2=0,029$) οι συσχετίσεις ήταν ασθενέστερες. Αξίζει να σημειωθεί ότι, παρότι η κλίση ήταν μεγαλύτερη την άνοιξη, η υψηλότερη τιμή του R² παρατηρήθηκε τον χειμώνα. Επομένως, το μέγεθος της κλίσης δεν ταυτίζεται κατ' ανάγκη με την ικανότητα του μοντέλου να εξηγήει τη μεταβλητότητα της ΔO₃.

Στους Θρακομακεδόνες, θετική συνδιακύμανση καταγράφηκε τον χειμώνα, την άνοιξη και το καλοκαίρι. Τον χειμώνα οι τιμές ήταν $r=0,150$, $\beta=0,594$ και $R^2=0,023$, ενώ την άνοιξη η

σχέση ενισχύθηκε αισθητά ($r=0,265$, $\beta=1,701$, $R^2=0,070$, $p<0,001$). Παρόμοια ήταν και η θερινή εικόνα, με $r=0,248$, $\beta=2,179$ και $R^2=0,062$. Το φθινόπωρο, όμως, η σχέση σχεδόν εξαφανίστηκε ($r=0,015$, $R^2<0,001$, $p=0,680$), γεγονός που δείχνει ότι η θετική βραχυχρόνια σύνδεση δεν διατηρήθηκε σε όλη τη διάρκεια του έτους.

Η Λυκόβρυση παρουσίασε το σαφέστερο βραχυχρόνιο σήμα μεταξύ των δύο μεταβολών. Τον χειμώνα καταγράφηκε η υψηλότερη συσχέτιση της ενότητας, με $r=0,383$, $\beta=2,602$, $R^2=0,147$ και $p<0,001$. Σύμφωνα με το γραμμικό μοντέλο, αύξηση της ΔT κατά 1°C συνδεόταν με εκτιμώμενη αύξηση της ΔO_3 κατά $2,602\text{ }\mu\text{g}/\text{m}^3$, ενώ η ΔT εξηγούσε το 14,7% της μεταβλητότητας της ΔO_3 . Την άνοιξη η σχέση παρέμεινε θετική, αλλά ήταν ασθενέστερη ($r=0,215$, $R^2=0,046$). Το καλοκαίρι περιορίστηκε σημαντικά και δεν ήταν στατιστικά σημαντική ($r=0,064$, $R^2=0,004$, $p=0,098$), ενώ το φθινόπωρο επανεμφανίστηκε θετική και στατιστικά σημαντική συσχέτιση, με $r=0,190$, $\beta=1,614$ και $R^2=0,036$.

Στην Πατησίων δεν διαμορφώθηκε σταθερή βραχυχρόνια σχέση μεταξύ ΔT και ΔO_3 . Οι συσχετίσεις ήταν σχεδόν μηδενικές τον χειμώνα ($r=0,011$, $R^2<0,001$, $p=0,767$) και την άνοιξη ($r=0,036$, $R^2=0,001$, $p=0,327$). Το καλοκαίρι καταγράφηκε πολύ ασθενής θετική αλλά στατιστικά σημαντική σχέση ($r=0,106$, $\beta=1,045$, $R^2=0,011$, $p=0,006$), ενώ το φθινόπωρο η συσχέτιση ήταν πολύ ασθενής, αρνητική και μη στατιστικά σημαντική ($r=-0,035$, $R^2=0,001$, $p=0,351$). Η θερινή στατιστική σημαντικότητα, επομένως, δεν συνοδεύτηκε από ουσιαστική ερμηνευτική ισχύ.

Η εποχική εικόνα διαφοροποιήθηκε αισθητά μεταξύ των σταθμών. Τον χειμώνα, θετικές σχέσεις εμφανίστηκαν στην Ελευσίνα, στους Θρακομακεδόνες και κυρίως στη Λυκόβρυση, αλλά όχι στην Πατησίων. Την άνοιξη, η θετική κατεύθυνση διατηρήθηκε στους ίδιους τρεις σταθμούς. Το καλοκαίρι, η σχέση ήταν περισσότερο εμφανής στους Θρακομακεδόνες και σαφώς ασθενέστερη στις υπόλοιπες θέσεις, ενώ το φθινόπωρο στατιστικά σημαντικές θετικές συσχετίσεις παρέμειναν μόνο στην Ελευσίνα και στη Λυκόβρυση.

Η σύγκριση με τα αποτελέσματα των ημερήσιων μέσων τιμών δείχνει ότι η χρήση πρώτων διαφορών περιόρισε σε αρκετές περιπτώσεις την ερμηνευτική ικανότητα των μοντέλων. Οι ισχυρότερες σχέσεις που είχαν παρατηρηθεί μεταξύ των απόλυτων επιπέδων θερμοκρασίας και O_3 , ιδιαίτερα το φθινόπωρο στους Θρακομακεδόνες και στην Ελευσίνα, δεν διατηρήθηκαν με την ίδια ένταση όταν εξετάστηκε η μεταβολή από ημέρα σε ημέρα. Αυτό υποδηλώνει ότι μέρος της σχέσης των ημερήσιων μέσων τιμών αντανακλά ευρύτερες εποχικές ή μεσοπρόθεσμες μεταβολές, οι οποίες περιορίζονται όταν χρησιμοποιούνται πρώτες διαφορές.

Η συνολική εικόνα ήταν συχνότερα θετική, αλλά κατά κανόνα ασθενής. Η υψηλότερη τιμή του R^2 ήταν 0,147 και καταγράφηκε στη Λυκόβρυση τον χειμώνα, ενώ στους περισσότερους συνδυασμούς σταθμού και εποχής το R^2 δεν υπερέβη το 0,070. Επομένως, η ημερήσια μεταβολή της θερμοκρασίας δεν μπορεί να θεωρηθεί ισχυρός μεμονωμένος γραμμικός παράγοντας της ημερήσιας μεταβολής του O_3 . Η παρατηρούμενη μεταβλητότητα είναι πιθανό να συνδέεται επίσης με μεταβολές της ηλιακής ακτινοβολίας, των πρόδρομων ενώσεων, της ατμοσφαιρικής ανάμιξης, της μεταφοράς αέριων μαζών και άλλων παραμέτρων που δεν περιλαμβάνονται στα συγκεκριμένα διμεταβλητά μοντέλα.

4.7.3 Κατανομή της ημερήσιας μεταβολής της συγκέντρωσης O_3 ανά κατηγορία ημερήσιας μεταβολής της θερμοκρασίας

Πέρα από την εκτίμηση μιας συνολικής γραμμικής σχέσης, κρίθηκε χρήσιμο να εξεταστεί αν η απόκριση του O_3 διαφοροποιείται ανάλογα με το μέγεθος και την κατεύθυνση της ημερήσιας μεταβολής της θερμοκρασίας. Για τον σκοπό αυτό, οι τιμές της ΔT ταξινομήθηκαν σε πέντε κατηγορίες, ώστε να συγκριθεί η κατανομή της ΔO_3 σε επεισόδια μείωσης, σχετικής σταθερότητας και αύξησης της θερμοκρασίας. Η προσέγγιση αυτή επιτρέπει να διαπιστωθεί αν διαφορετικού τύπου θερμοκρασιακές μεταβολές συνοδεύονται από συστηματικές διαφοροποιήσεις στη θέση και στη διασπορά των ημερήσιων μεταβολών του O_3 .

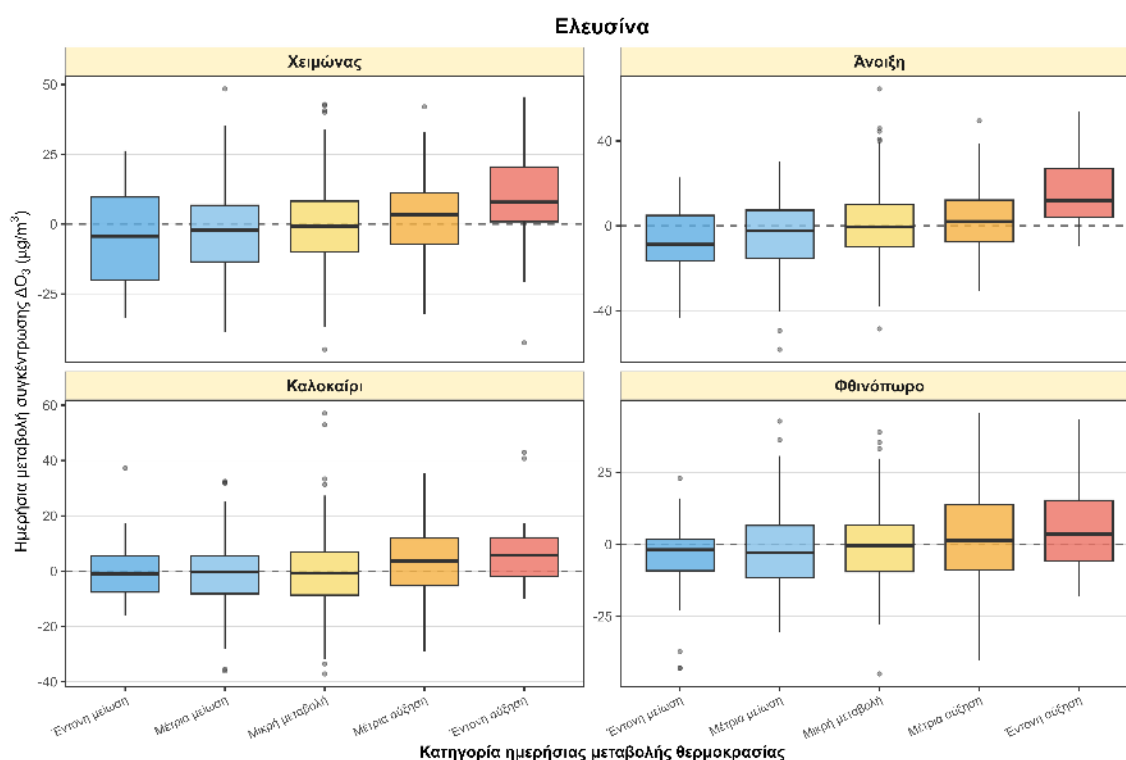
Η ανάλυση πραγματοποιήθηκε χωριστά ανά εποχή και σταθμό μέτρησης και περιέλαβε αποκλειστικά ζεύγη πραγματικά διαδοχικών ημερών με ταυτόχρονα έγκυρες παρατηρήσεις θερμοκρασίας και O_3 . Με τον τρόπο αυτό διασφαλίστηκε ότι οι υπολογιζόμενες μεταβολές αντιστοιχούν σε πραγματικές ημερήσιες διαφορές και δεν επηρεάζονται από χρονικά κενά στις χρονοσειρές.

Οι κατηγορίες της ημερήσιας μεταβολής της θερμοκρασίας ορίστηκαν ως εξής:

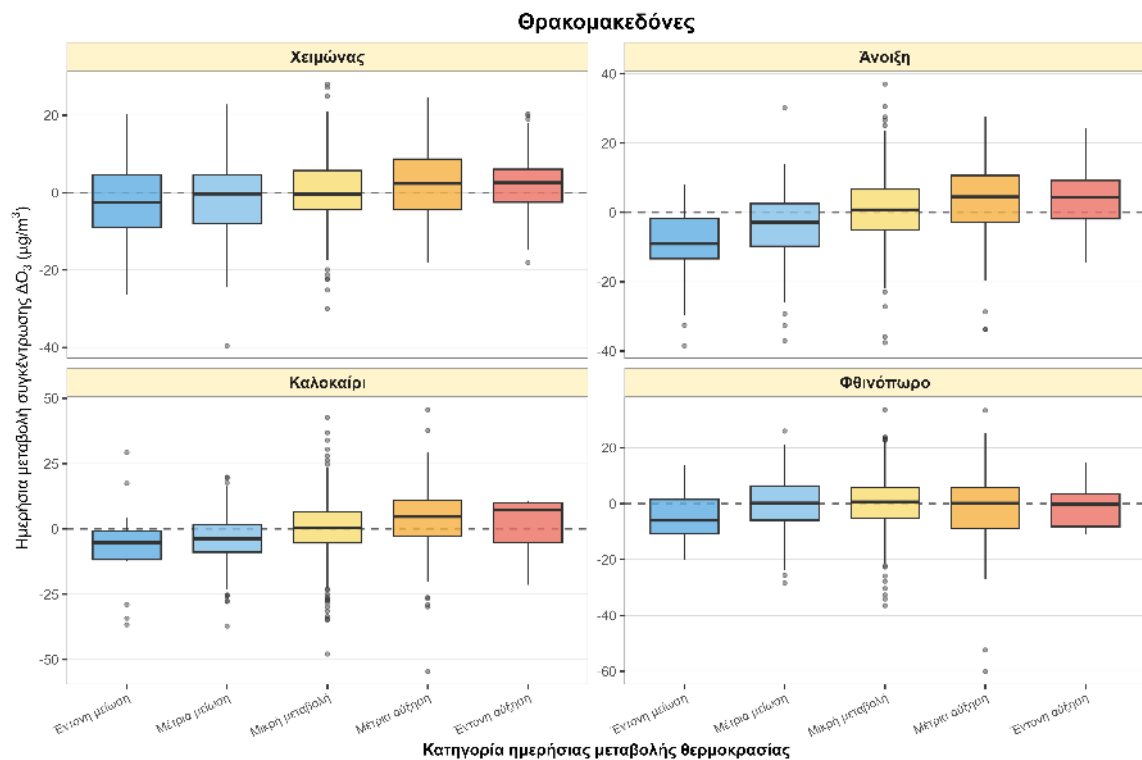
- ισχυρή μείωση: $\Delta T < -3\text{ }^\circ\text{C}$,
- μέτρια μείωση: $-3\text{ }^\circ\text{C} \leq \Delta T < -1\text{ }^\circ\text{C}$,
- μικρή μεταβολή: $-1\text{ }^\circ\text{C} \leq \Delta T < 1\text{ }^\circ\text{C}$,
- μέτρια αύξηση: $1\text{ }^\circ\text{C} \leq \Delta T < 3\text{ }^\circ\text{C}$,
- ισχυρή αύξηση: $\Delta T \geq 3\text{ }^\circ\text{C}$.

Η κατανομή της ΔO_3 σε κάθε κατηγορία αποτυπώθηκε μέσω διαγραμμάτων πλαισίου και απολήξεων. Η σύγκριση βασίστηκε κυρίως στη θέση της διαμέσου, στο ενδοτεταρτημοριακό εύρος, στη διασπορά των τιμών και στον βαθμό επικάλυψης των κατανομών, ώστε να αξιολογηθεί αν οι μειώσεις ή οι αυξήσεις της θερμοκρασίας συνοδεύονται από αντίστοιχη μετατόπιση των ημερήσιων μεταβολών του O_3 . Η οπτική αυτή εξέταση λειτουργεί συμπληρωματικά προς τα αποτελέσματα της συσχέτισης και της απλής γραμμικής παλινδρόμησης.

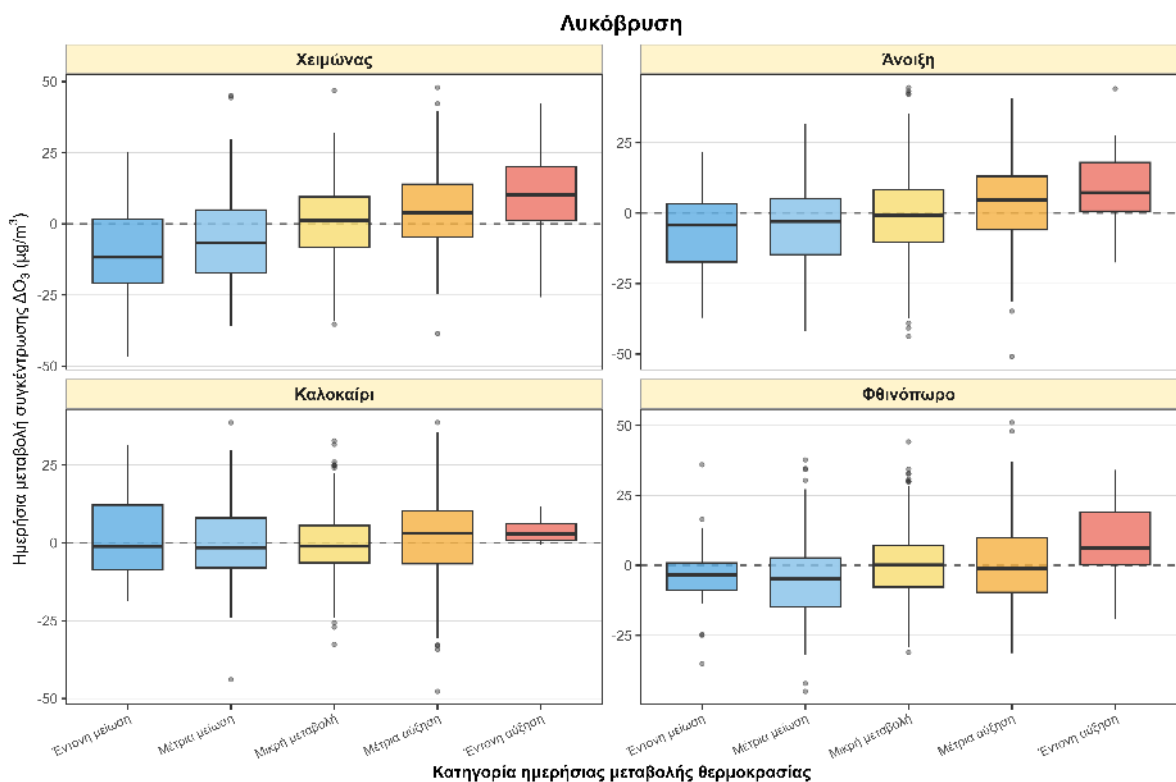
Τα αποτελέσματα παρουσιάζονται στα Σχήματα 4.51–4.54.



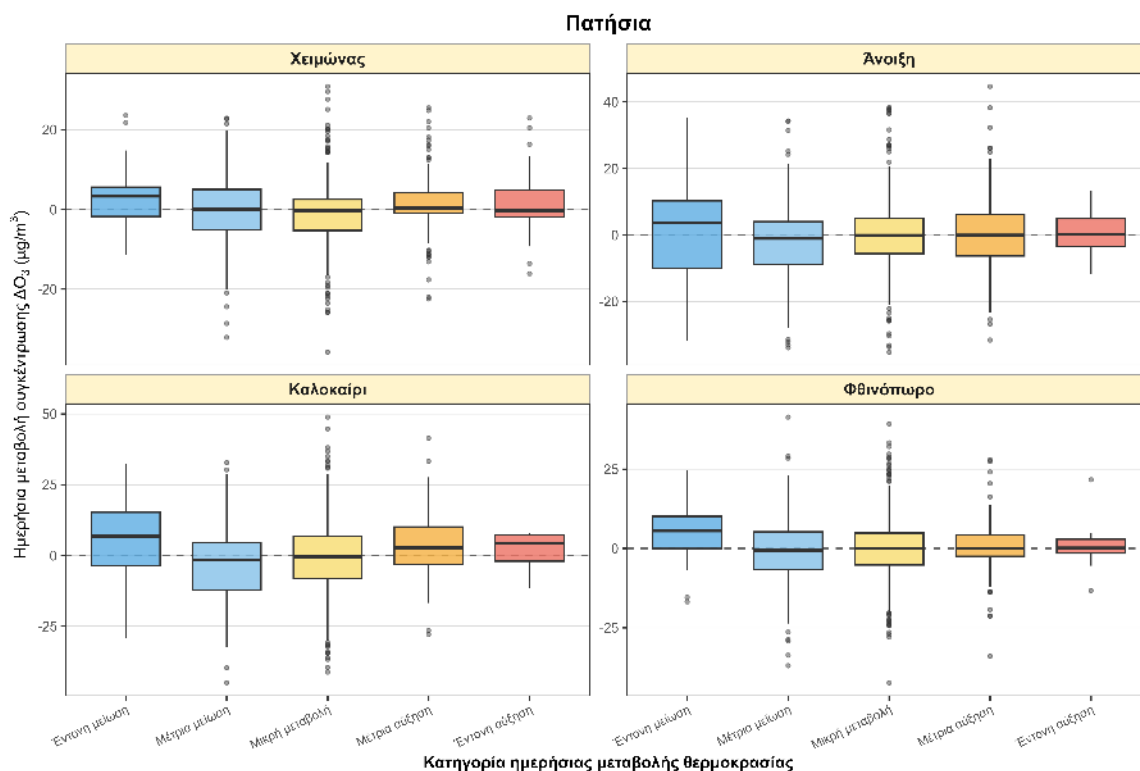
Σχήμα 4.51. Κατανομή της ημερήσιας μεταβολής της συγκέντρωσης O_3 ανά κατηγορία ημερήσιας μεταβολής της μέσης θερμοκρασίας και εποχή στον **σταθμό Ελευσίνας** κατά την περίοδο 2016–2024.



Σχήμα 4.52. Κατανομή της ημερήσιας μεταβολής της συγκέντρωσης O_3 ανά κατηγορία ημερήσιας μεταβολής της μέσης θερμοκρασίας και εποχή στον **σταθμό Θρακομακεδόνων** κατά την περίοδο 2016–2024.



Σχήμα 4.53. Κατανομή της ημερήσιας μεταβολής της συγκέντρωσης O_3 ανά κατηγορία ημερήσιας μεταβολής της μέσης θερμοκρασίας και εποχή στον **σταθμό Λυκόβρυσης** κατά την περίοδο 2016–2024.



Σχήμα 4.54. Κατανομή της ημερήσιας μεταβολής της συγκέντρωσης O_3 ανά κατηγορία ημερήσιας μεταβολής της μέσης θερμοκρασίας και εποχή στον **σταθμό Πατησίων** κατά την περίοδο 2016–2024.

Σημείωση: Η κεντρική γραμμή κάθε πλαισίου αποτυπώνει τη διάμεσο και το πλαίσιο το ενδοτεταρτημοριακό εύρος. Οι απολήξεις περιλαμβάνουν τις τιμές εντός των αντίστοιχων ορίων, ενώ τα μεμονωμένα σημεία αντιπροσωπεύουν τιμές εκτός των απολήξεων. Η διακεκομμένη οριζόντια γραμμή δηλώνει μηδενική ημερήσια μεταβολή της συγκέντρωσης O_3 .

Η εξέταση των Σχημάτων 4.51–4.54 ανέδειξε ότι η κατανομή της ημερήσιας μεταβολής του O_3 διαφοροποιείται συστηματικά ως προς την κατεύθυνση της θερμοκρασιακής μεταβολής, χωρίς όμως η διαφοροποίηση αυτή να εμφανίζεται με την ίδια ένταση σε όλους τους σταθμούς και σε όλες τις εποχές. Το κυριότερο εύρημα ήταν η σταδιακή μετατόπιση της ΔO_3 από αρνητικότερες προς θετικότερες τιμές καθώς οι κατηγορίες της ΔT μεταβάλλονταν από έντονη μείωση προς έντονη αύξηση. Η συγκεκριμένη διαβάθμιση ήταν περισσότερο συνεπής στην Ελευσίνα και στη Λυκόβρυση, λιγότερο σταθερή στους Θρακομακεδόνες και ουσιαστικά απύσα στην Πατησίων.

Στην Ελευσίνα, οι διάμεσοι της ΔO_3 ακολούθησαν γενικά ανοδική πορεία μεταξύ των διαδοχικών κατηγοριών της ΔT . Οι αρνητικές θερμοκρασιακές μεταβολές συνδέθηκαν συχνότερα με μειώσεις του O_3 , ενώ οι θετικές μεταβολές της θερμοκρασίας συνοδεύτηκαν από θετικότερες τιμές ΔO_3 . Η διαβάθμιση ήταν εμφανέστερη κατά τον χειμώνα και την άνοιξη, αλλά παρέμεινε διακριτή και στις υπόλοιπες εποχές. Το εύρημα αυτό ενισχύει την εικόνα θετικής βραχυχρόνιας συνδιακύμανσης που προέκυψε από τα αντίστοιχα γραμμικά μοντέλα.

Ακόμη σαφέστερη ήταν η εικόνα στη Λυκόβρυση. Κατά τον χειμώνα και την άνοιξη παρατηρήθηκε ουσιαστικός διαχωρισμός των ακραίων κατηγοριών, καθώς η έντονη μείωση της θερμοκρασίας αντιστοιχούσε σε σαφώς αρνητικές διαμέσους ΔO_3 , ενώ η έντονη αύξηση σε θετικές. Η ίδια κατεύθυνση διατηρήθηκε και κατά το καλοκαίρι και το φθινόπωρο, αν και με μεγαλύτερη επικάλυψη των ενδιάμεσων κατηγοριών. Η συνέπεια αυτή μεταξύ της κατηγοριοποιημένης και της γραμμικής ανάλυσης υποδηλώνει ότι στον συγκεκριμένο σταθμό η βραχυχρόνια μεταβολή της θερμοκρασίας συνδέεται πιο σταθερά με τη μεταβολή του O_3 σε σύγκριση με τις υπόλοιπες θέσεις.

Στους Θρακομακεδόνες καταγράφηκε ενδιάμεση συμπεριφορά. Κατά τον χειμώνα, την άνοιξη και το καλοκαίρι διακρίθηκε γενική μετατόπιση προς θετικότερες τιμές ΔO_3 στις κατηγορίες αύξησης της θερμοκρασίας. Ωστόσο, η ακολουθία των διαμέσων δεν ήταν πάντοτε μονοτονική και οι κατανομές παρουσίασαν μεγαλύτερη επικάλυψη. Κατά το φθινόπωρο οι διαφορές μεταξύ των κατηγοριών περιορίστηκαν αισθητά, γεγονός που συμφωνεί με την απουσία ουσιαστικής γραμμικής σχέσης μεταξύ ΔT και ΔO_3 για την ίδια εποχή.

Αντίθετα, στην Πατησίων δεν διαμορφώθηκε σταθερή διάταξη των κατηγοριών. Οι διάμεσοι παρέμειναν κυρίως γύρω από τη μηδενική μεταβολή και δεν ακολούθησαν συστηματική μετάβαση από τις κατηγορίες μείωσης προς τις κατηγορίες αύξησης της θερμοκρασίας. Σε ορισμένες εποχές, και ιδιαίτερα τον χειμώνα και το φθινόπωρο, οι ημέρες έντονης μείωσης της θερμοκρασίας εμφάνισαν θετικότερες τιμές ΔO_3 από ορισμένες κατηγορίες αύξησης. Η εικόνα αυτή διαφοροποιεί σαφώς την Πατησίων από τους υπόλοιπους σταθμούς και είναι συμβατή με τις πολύ ασθενείς συσχετίσεις που προέκυψαν από την ανάλυση των ημερήσιων διαφορών.

Παρά τη διακριτή μετατόπιση των διαμέσων σε ορισμένες περιπτώσεις, η σημαντική επικάλυψη των πλαισίων και των απολήξεων δείχνει ότι η θερμοκρασιακή κατηγορία δεν

προσδιορίζει μονοσήμαντα την ημερήσια μεταβολή του O_3 . Η μεταβλητότητα εντός κάθε κατηγορίας παρέμεινε υψηλή, ενώ παρατηρήθηκαν και πολυάριθμες τιμές εκτός των απολήξεων. Συνεπώς, οι διαφορές που αποτυπώνονται στα διαγράμματα πρέπει να ερμηνεύονται ως μετατοπίσεις της κεντρικής τάσης και όχι ως πλήρης διαχωρισμός των κατανομών.

Συνολικά, η ανάλυση ανέδειξε μια χωρικά διαφοροποιημένη βραχυχρόνια απόκριση του O_3 στις μεταβολές της θερμοκρασίας. Η Ελευσίνα και κυρίως η Λυκόβρυση παρουσίασαν το συνεπέστερο θετικό πρότυπο, οι Θρακομακεδόνες εμφάνισαν μερική και εποχικά εξαρτώμενη διαβάθμιση, ενώ στην Πατησίων η σχέση παρέμεινε ασταθής. Επομένως, η ημερήσια μεταβολή της θερμοκρασίας φαίνεται να συνδέεται με τη θέση της κατανομής της ΔO_3 σε ορισμένους σταθμούς, χωρίς όμως να αποτελεί επαρκή από μόνη της παράγοντα για την ερμηνεία της συνολικής ημερήσιας μεταβλητότητας του όζοντος.

4.7.4 Συγκριτική παρουσίαση των αποτελεσμάτων για το O_3

Η σύγκριση των δύο αναλυτικών προσεγγίσεων επιτρέπει να εξεταστεί αφενός η σχέση μεταξύ των ημερήσιων επιπέδων θερμοκρασίας και O_3 και αφετέρου η βραχυχρόνια συνδιακύμανση των μεταβολών τους από ημέρα σε ημέρα. Οι δύο προσεγγίσεις αποτυπώνουν διαφορετικές χρονικές διαστάσεις της σχέσης: η πρώτη βασίζεται στις απόλυτες ημερήσιες τιμές εντός κάθε εποχής, ενώ η δεύτερη εστιάζει στις μεταβολές μεταξύ διαδοχικών ημερών. Με τον τρόπο αυτό καθίσταται δυνατή η διάκριση μεταξύ των ευρύτερων εποχικών προτύπων και των πιο άμεσων βραχυχρόνιων μεταβολών που εμφανίζονται σε τοπικό επίπεδο.

Για κάθε συνδυασμό σταθμού και εποχής παρουσιάζονται ο αριθμός των παρατηρήσεων, ο συντελεστής συσχέτισης Pearson r , η μη τυποποιημένη κλίση της απλής γραμμικής παλινδρόμησης β , το 95% διάστημα εμπιστοσύνης της κλίσης, η τιμή p και ο συντελεστής προσδιορισμού R^2 . Η παράλληλη εξέταση των δεικτών αυτών επιτρέπει την αξιολόγηση της κατεύθυνσης, της έντασης, της στατιστικής σημαντικότητας και της ερμηνευτικής ικανότητας των σχέσεων.

Τα συγκεντρωτικά αποτελέσματα παρατίθενται στους Πίνακες 4.8 και 4.9.

Πίνακας 4.8. Στατιστικά αποτελέσματα της σχέσης μεταξύ ημερήσιας μέσης θερμοκρασίας και ημερήσιας μέσης συγκέντρωσης O₃								
Σταθμός	Εποχή	n	r Pearson	β ₁	95% ΔΕ κάτω	95% ΔΕ άνω	p	R ²
Ελευσίνα	Χειμώνας	670	-0,220	-1,074	-1,436	-0,713	<0,001	0,048
Ελευσίνα	Άνοιξη	715	0,332	1,397	1,105	1,688	<0,001	0,110
Ελευσίνα	Καλοκαίρι	698	0,243	1,319	0,927	1,711	<0,001	0,059
Ελευσίνα	Φθινόπωρο	652	0,600	2,842	2,550	3,134	<0,001	0,360
Θρακομακεδόνες	Χειμώνας	694	0,028	0,099	-0,164	0,361	0,461	0,001
Θρακομακεδόνες	Άνοιξη	746	0,473	1,495	1,295	1,696	<0,001	0,223
Θρακομακεδόνες	Καλοκαίρι	758	0,522	2,747	2,427	3,067	<0,001	0,273
Θρακομακεδόνες	Φθινόπωρο	733	0,633	2,493	2,271	2,714	<0,001	0,400
Λυκόβρυση	Χειμώνας	729	0,019	0,095	-0,264	0,454	0,603	0,000
Λυκόβρυση	Άνοιξη	710	0,258	0,973	0,704	1,243	<0,001	0,066
Λυκόβρυση	Καλοκαίρι	686	0,359	2,151	1,731	2,570	<0,001	0,129
Λυκόβρυση	Φθινόπωρο	684	0,485	2,293	1,982	2,604	<0,001	0,235
Πατησίων	Χειμώνας	775	-0,291	-0,746	-0,920	-0,573	<0,001	0,085
Πατησίων	Άνοιξη	757	-0,213	-0,726	-0,964	-0,488	<0,001	0,045
Πατησίων	Καλοκαίρι	702	0,220	1,411	0,948	1,874	<0,001	0,049
Πατησίων	Φθινόπωρο	734	0,036	0,111	-0,114	0,337	0,333	0,001

Πίνακας 4.8. Στατιστικά αποτελέσματα της απλής γραμμικής παλινδρόμησης μεταξύ της ημερήσιας μέσης θερμοκρασίας και της ημερήσιας μέσης συγκέντρωσης O₃, ανά σταθμό μέτρησης και εποχή, κατά την περίοδο 2016–2024.

Πίνακας 4.9. Στατιστικά αποτελέσματα της σχέσης μεταξύ της ημερήσιας μεταβολής της θερμοκρασίας και της ημερήσιας μεταβολής της συγκέντρωσης O₃								
Σταθμός	Εποχή	n	r Pearson	β ₁	95% ΔΕ κάτω	95% ΔΕ άνω	p	R ²
Ελευσίνα	Χειμώνας	660	0,256	1,832	1,301	2,362	<0,001	0,065
Ελευσίνα	Άνοιξη	709	0,232	2,275	1,572	2,978	<0,001	0,054
Ελευσίνα	Καλοκαίρι	685	0,131	1,127	0,486	1,768	<0,001	0,017
Ελευσίνα	Φθινόπωρο	644	0,170	1,434	0,790	2,078	<0,001	0,029
Θρακομακεδόνες	Χειμώνας	672	0,150	0,594	0,297	0,891	<0,001	0,023
Θρακομακεδόνες	Άνοιξη	732	0,265	1,701	1,252	2,150	<0,001	0,070
Θρακομακεδόνες	Καλοκαίρι	735	0,248	2,179	1,562	2,796	<0,001	0,062
Θρακομακεδόνες	Φθινόπωρο	725	0,015	0,101	-0,378	0,580	0,680	0,000
Λυκόβρυση	Χειμώνας	706	0,383	2,602	2,138	3,066	<0,001	0,147
Λυκόβρυση	Άνοιξη	691	0,215	1,940	1,280	2,599	<0,001	0,046
Λυκόβρυση	Καλοκαίρι	664	0,064	0,558	-0,102	1,219	0,098	0,004
Λυκόβρυση	Φθινόπωρο	663	0,190	1,614	0,976	2,253	<0,001	0,036
Πατήσια	Χειμώνας	755	0,011	0,048	-0,272	0,368	0,767	0,000
Πατήσια	Άνοιξη	729	0,036	0,277	-0,278	0,832	0,327	0,001
Πατήσια	Καλοκαίρι	664	0,106	1,045	0,297	1,794	0,006	0,011
Πατήσια	Φθινόπωρο	709	-0,035	-0,245	-0,761	0,271	0,351	0,001

Πίνακας 4.9. Στατιστικά αποτελέσματα της απλής γραμμικής παλινδρόμησης μεταξύ της ημερήσιας μεταβολής της μέσης θερμοκρασίας και της ημερήσιας μεταβολής της συγκέντρωσης O₃, ανά σταθμό μέτρησης και εποχή, κατά την περίοδο 2016–2024.

Σημείωση: n = αριθμός παρατηρήσεων, r = συντελεστής συσχέτισης Pearson, β = κλίση της απλής γραμμικής παλινδρόμησης, 95% ΔΕ = 95% διάστημα εμπιστοσύνης της κλίσης, p = τιμή στατιστικής σημαντικότητας και R² = συντελεστής προσδιορισμού.

Η ανάλυση των ημερήσιων μέσων τιμών ανέδειξε το σαφέστερο θερμοκρασιακό σήμα μεταξύ των ρύπων που εξετάστηκαν. Στην Ελευσίνα, στους Θρακομακεδόνες και στη Λυκόβρυση, η σχέση θερμοκρασίας–O₃ ήταν κατά κανόνα θετική κατά την άνοιξη, το καλοκαίρι και το φθινόπωρο. Η συνέπεια αυτή υποδηλώνει ότι, στις συγκεκριμένες θέσεις και εποχές, οι θερμότερες ημέρες συνέπιπταν συστηματικά με υψηλότερα ημερήσια επίπεδα όζοντος.

Το ισχυρότερο αποτέλεσμα καταγράφηκε στους Θρακομακεδόνες κατά το φθινόπωρο, με $r=0,633$, $\beta=2,493 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ανά °C, $R^2=0,400$ και $p<0,001$. Το γραμμικό μοντέλο απέδωσε το 40,0% της παρατηρούμενης μεταβλητότητας της συγκέντρωσης O₃, ποσοστό σαφώς υψηλότερο από εκείνο των περισσότερων αναλύσεων των προηγούμενων ρύπων. Ισχυρή θετική σχέση παρατηρήθηκε και στην Ελευσίνα κατά το φθινόπωρο, με $r=0,600$, $\beta=2,842 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ανά °C και $R^2=0,360$. Σημαντική ερμηνευτική ικανότητα εμφάνισαν επίσης οι Θρακομακεδόνες κατά το καλοκαίρι ($R^2=0,273$) και την άνοιξη ($R^2=0,223$), καθώς και η Λυκόβρυση κατά το φθινόπωρο ($R^2=0,235$).

Η εποχική συνοχή δεν διατηρήθηκε κατά τον χειμώνα. Στην Ελευσίνα καταγράφηκε αρνητική σχέση ($r=-0,220$, $R^2=0,048$), ενώ στον σταθμό Πατησίων η αρνητική συσχέτιση ήταν εντονότερη ($r=-0,291$, $R^2=0,085$). Αντίθετα, στους Θρακομακεδόνες και στη Λυκόβρυση οι χειμερινές σχέσεις ήταν ουσιαστικά μηδενικές και μη στατιστικά σημαντικές. Επομένως, το θετικό πρότυπο των θερμότερων εποχών δεν αποτελεί γενικευμένο ετήσιο χαρακτηριστικό, αλλά εξαρτάται από τον συνδυασμό εποχής και θέσης μέτρησης.

Ο σταθμός Πατησίων παρουσίασε τη μεγαλύτερη απόκλιση από τη συμπεριφορά των υπόλοιπων σταθμών. Κατά τον χειμώνα και την άνοιξη καταγράφηκαν αρνητικές σχέσεις, το καλοκαίρι θετική σχέση και το φθινόπωρο πρακτικά απουσία γραμμικής σύνδεσης. Η εναλλαγή αυτή υποδηλώνει ότι η σχέση θερμοκρασίας–O₃ στη συγκεκριμένη αστική θέση δεν ακολουθεί το συνεπέστερο θετικό πρότυπο που παρατηρήθηκε στις άλλες περιοχές. Παράλληλα, οι χαμηλότερες συγκεντρώσεις O₃ και η διαφορετική εποχική απόκριση ενδέχεται να συνδέονται με ιδιαίτερα τοπικά χαρακτηριστικά, χωρίς όμως οι συγκεκριμένοι παράγοντες να μπορούν να απομονωθούν από τα παρόντα διμεταβλητά μοντέλα.

Η ανάλυση των ημερήσιων μεταβολών ανέδειξε διαφορετική εικόνα. Οι σχέσεις μεταξύ ΔT και ΔO₃ ήταν συχνά θετικές, αλλά γενικά ασθενέστερες από τις αντίστοιχες σχέσεις των ημερήσιων μέσων τιμών. Η ισχυρότερη βραχυχρόνια συσχέτιση καταγράφηκε στη

Λυκόβρυση κατά τον χειμώνα, με $r=0,383$, $\beta=2,602 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ανά $^{\circ}\text{C}$, $R^2=0,147$ και $p<0,001$. Στην περίπτωση αυτή, αύξηση της ημερήσιας μεταβολής της θερμοκρασίας κατά 1°C αντιστοιχούσε σε εκτιμώμενη αύξηση της ΔO_3 κατά $2,602 \mu\text{g}/\text{m}^3$.

Στην Ελευσίνα παρατηρήθηκαν θετικές και στατιστικά σημαντικές σχέσεις σε όλες τις εποχές, αλλά οι τιμές του R^2 κυμάνθηκαν μόνο από $0,017$ έως $0,065$. Στους Θρακομακεδόνες, θετικές σχέσεις καταγράφηκαν κατά τον χειμώνα, την άνοιξη και το καλοκαίρι, ενώ το φθινόπωρο η σχέση ήταν σχεδόν μηδενική. Στη Λυκόβρυση η θετική συνδιακύμανση ήταν εντονότερη τον χειμώνα, ασθενέστερη την άνοιξη και το φθινόπωρο και μη στατιστικά σημαντική το καλοκαίρι. Στον σταθμό Πατησίων, αντίθετα, δεν προέκυψε σταθερό βραχυχρόνιο πρότυπο· μόνο κατά το καλοκαίρι καταγράφηκε πολύ ασθενής αλλά στατιστικά σημαντική θετική σχέση.

Η διαφοροποίηση μεταξύ των δύο προσεγγίσεων είναι ιδιαίτερα εμφανής στις μέγιστες τιμές του R^2 . Στην ανάλυση των ημερήσιων μέσων τιμών η υψηλότερη τιμή έφθασε το $0,400$, ενώ στην ανάλυση των ημερήσιων μεταβολών περιορίστηκε στο $0,147$. Η διαφορά αυτή δεν πρέπει να εκλαμβάνεται ως άμεση σύγκριση μοντέλων με ταυτόσημη εξαρτημένη μεταβλητή, αλλά δείχνει ότι η σχέση είναι ισχυρότερη όταν εξετάζονται τα ημερήσια επίπεδα θερμοκρασίας και O_3 παρά όταν απομονώνονται οι μεταβολές από τη μία ημέρα στην επόμενη.

Το εύρημα αυτό υποδηλώνει ότι οι ισχυρότερες συσχετίσεις των ημερήσιων μέσων τιμών ενσωματώνουν όχι μόνο τη βραχυχρόνια συνδιακύμανση, αλλά και ευρύτερες ενδοεποχικές μεταβολές. Η θερμοκρασία και το O_3 μπορεί να μεταβάλλονται παράλληλα υπό την επίδραση κοινών ατμοσφαιρικών συνθηκών, όπως η ηλιακή ακτινοβολία, η φωτοχημική δραστηριότητα, η διάρκεια παραμονής των αέριων μαζών και οι συνθήκες κατακόρυφης ανάμιξης. Επειδή οι παράγοντες αυτοί δεν συμπεριλήφθηκαν στα συγκεκριμένα μοντέλα, η παρατηρούμενη σχέση δεν μπορεί να αποδοθεί αποκλειστικά σε άμεση επίδραση της θερμοκρασίας.

Σε χωρικό επίπεδο διακρίνονται τρεις διαφορετικές συμπεριφορές. Οι Θρακομακεδόνες και η Ελευσίνα παρουσίασαν τις ισχυρότερες θετικές σχέσεις στα ημερήσια επίπεδα, κυρίως κατά το φθινόπωρο. Η Λυκόβρυση εμφάνισε περισσότερο συνεπή θετική συμπεριφορά και στις δύο χρονικές κλίμακες, με ιδιαίτερα σαφή βραχυχρόνια σχέση τον χειμώνα. Ο σταθμός Πατησίων διαφοροποιήθηκε, καθώς οι σχέσεις ήταν ασθενέστερες, μεταβαλλόμενες ως προς την κατεύθυνση και συχνά μη στατιστικά σημαντικές.

Σε σύγκριση με το NO και το NO₂, το O₃ εμφάνισε σαφέστερη και ισχυρότερη σχέση με τη θερμοκρασία, κυρίως στην ανάλυση των ημερήσιων μέσων τιμών και κατά την άνοιξη, το καλοκαίρι και το φθινόπωρο. Η εξασθένηση, όμως, των σχέσεων στην ανάλυση των πρώτων διαφορών δείχνει ότι η βραχυχρόνια ημερήσια συνδιακύμανση εξηγεί μόνο μέρος του παρατηρούμενου προτύπου. Η σχέση θερμοκρασίας–O₃ είναι επομένως πιο διακριτή από εκείνη των άλλων αζωτούχων ρύπων, παραμένει όμως χρονικά και χωρικά εξαρτώμενη και δεν αρκεί από μόνη της για την τεκμηρίωση αιτιώδους μηχανισμού.

4.8 Σχέση θερμοκρασίας και αιωρούμενων σωματιδίων PM₁₀

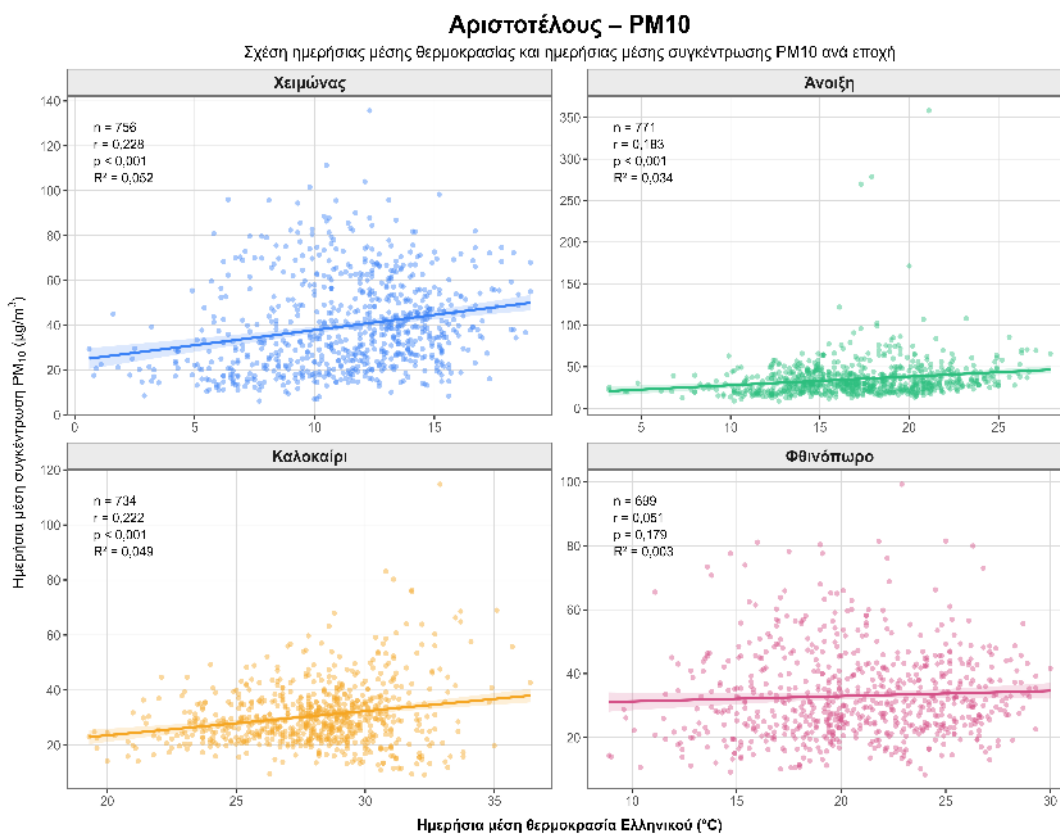
Η σχέση μεταξύ της θερμοκρασίας και της συγκέντρωσης αιωρούμενων σωματιδίων PM₁₀ διερευνήθηκε σε δύο συμπληρωματικές χρονικές κλίμακες. Στην πρώτη προσέγγιση εξετάστηκε η συνδιακύμανση της ημερήσιας μέσης θερμοκρασίας με την αντίστοιχη ημερήσια μέση συγκέντρωση PM₁₀, ώστε να αποτυπωθεί η σχέση των ημερήσιων επιπέδων των δύο μεταβλητών. Στη δεύτερη προσέγγιση αναλύθηκε η σχέση μεταξύ των ημερήσιων μεταβολών τους, με στόχο τη διερεύνηση της βραχυχρόνιας συνδιακύμανσης από τη μία ημέρα στην επόμενη.

Οι αναλύσεις πραγματοποιήθηκαν χωριστά ανά εποχή και σταθμό μέτρησης και βασίστηκαν αποκλειστικά σε ημέρες με ταυτόχρονα έγκυρες παρατηρήσεις θερμοκρασίας και PM₁₀. Για τον υπολογισμό των ημερήσιων μεταβολών διατηρήθηκαν μόνο ζεύγη παρατηρήσεων που αντιστοιχούσαν σε πραγματικά διαδοχικές ημερομηνίες, ώστε να αποφεύγεται η δημιουργία φαινομενικών διαφορών λόγω χρονικών κενών στις χρονοσειρές. Με τον τρόπο αυτό, οι δύο προσεγγίσεις επιτρέπουν τη διάκριση μεταξύ της σχέσης των απόλυτων ημερήσιων επιπέδων και της άμεσης βραχυχρόνιας μεταβολής των PM₁₀ σε συνάρτηση με τη θερμοκρασία.

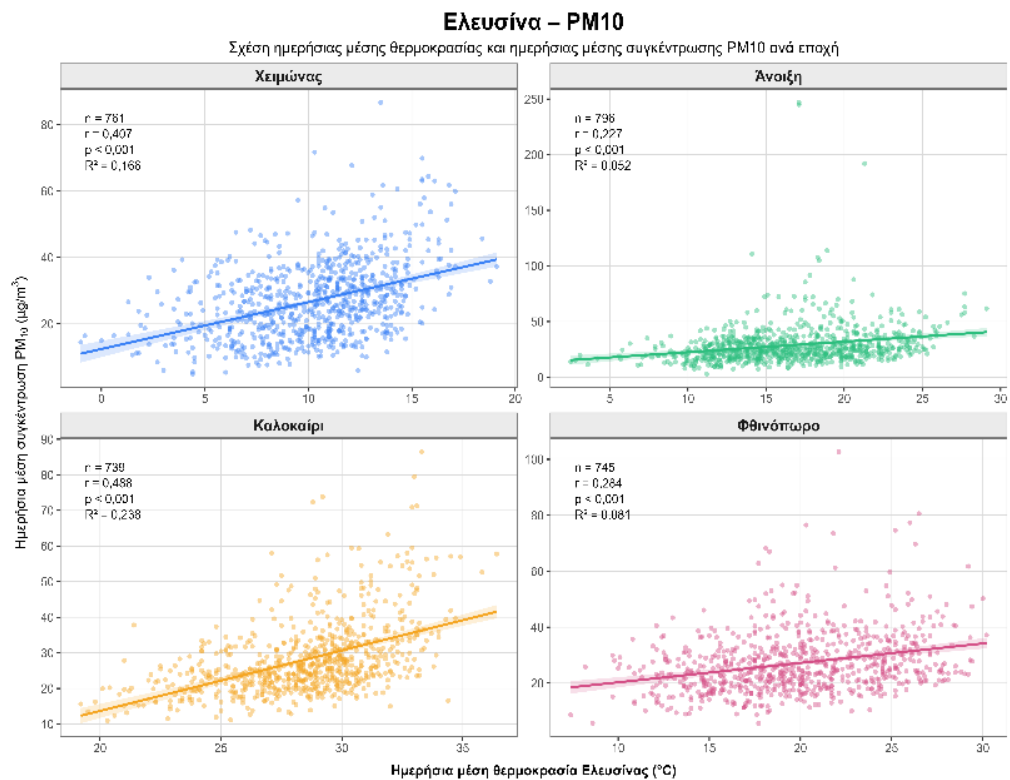
4.8.1 Σχέση ημερήσιας μέσης θερμοκρασίας και ημερήσιας συγκέντρωσης PM_{10} ανά εποχή και σταθμό

Σε πρώτο στάδιο εξετάστηκε κατά πόσο οι ημερήσιες διακυμάνσεις των επιπέδων θερμοκρασίας συνοδεύονταν από αντίστοιχες διαφοροποιήσεις στις ημερήσιες συγκεντρώσεις PM_{10} . Η ανάλυση πραγματοποιήθηκε χωριστά ανά εποχή και σταθμό, χρησιμοποιώντας αποκλειστικά ημέρες με ταυτόχρονα διαθέσιμες και έγκυρες μετρήσεις των δύο μεταβλητών.

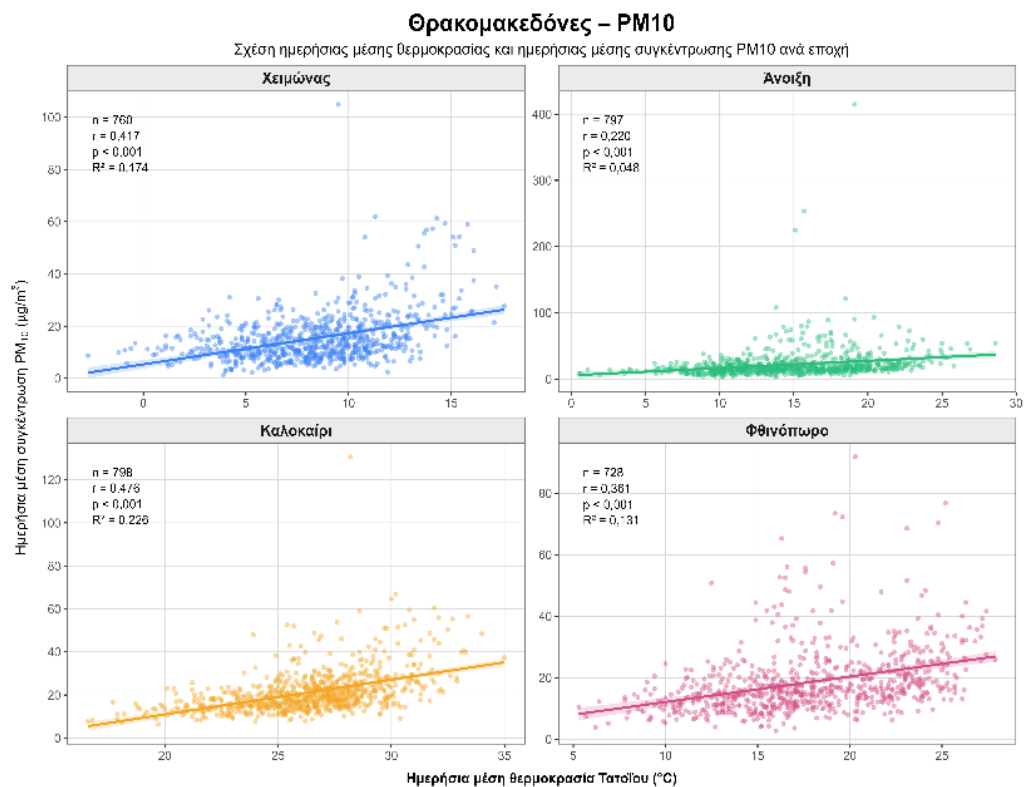
Για κάθε εποχικό υποσύνολο προσαρμόστηκε απλό γραμμικό μοντέλο, από το οποίο εκτιμήθηκαν ο συντελεστής συσχέτισης Pearson r , η κλίση β , το 95% διάστημα εμπιστοσύνης της κλίσης, η τιμή p και ο συντελεστής προσδιορισμού R^2 . Στα Σχήματα 4.55–4.58 αποτυπώνονται η διασπορά των ημερήσιων παρατηρήσεων, η εκτιμώμενη γραμμική τάση και η αβεβαιότητα της προσαρμογής για κάθε εποχή.



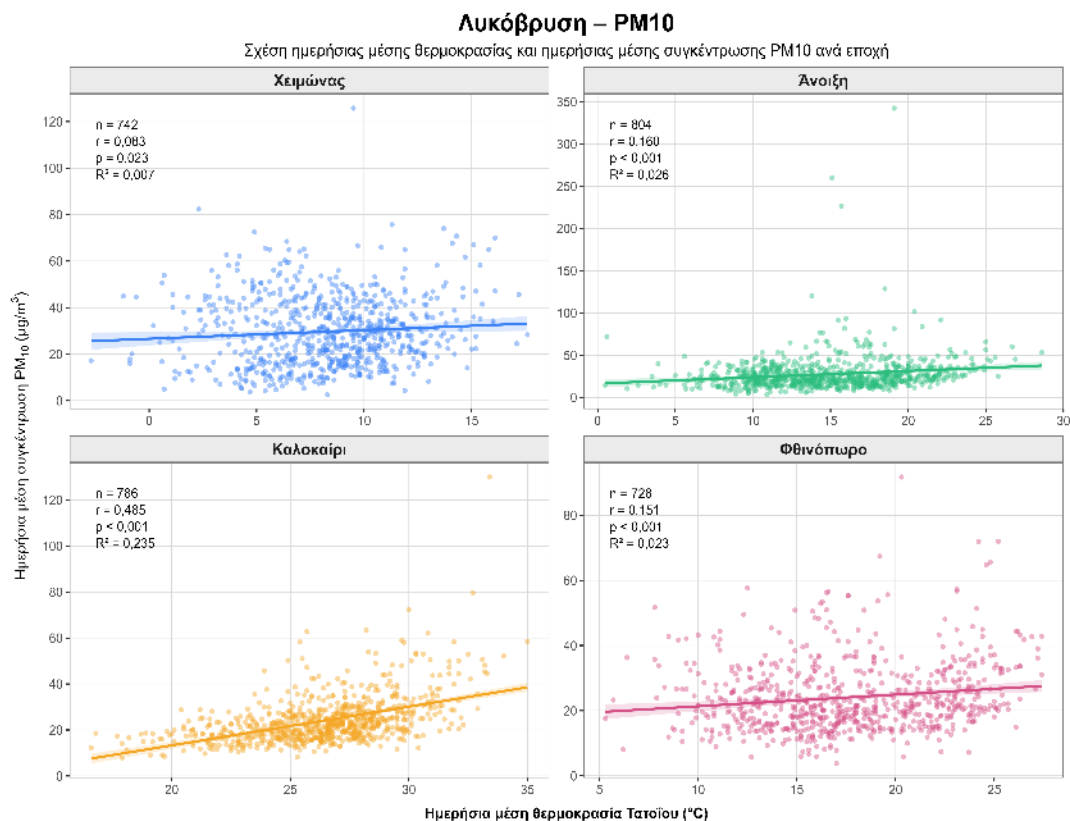
Σχήμα 4.55. Σχέση μεταξύ της ημερήσιας μέσης θερμοκρασίας και της ημερήσιας μέσης συγκέντρωσης PM_{10} ανά εποχή στον σταθμό Αριστοτέλους κατά την περίοδο 2016–2024.



Σχήμα 4.56. Σχέση μεταξύ της ημερήσιας μέσης θερμοκρασίας και της ημερήσιας μέσης συγκέντρωσης PM₁₀ ανά εποχή στον **σταθμό Ελευσίνας** κατά την περίοδο 2016–2024.



Σχήμα 4.57. Σχέση μεταξύ της ημερήσιας μέσης θερμοκρασίας και της ημερήσιας μέσης συγκέντρωσης PM₁₀ ανά εποχή στον **σταθμό Θρακομακεδόνων** κατά την περίοδο 2016–2024.



Σχήμα 4.58. Σχέση μεταξύ της ημερήσιας μέσης θερμοκρασίας και της ημερήσιας μέσης συγκέντρωσης PM₁₀ ανά εποχή στον **σταθμό Λυκόβρυσης** κατά την περίοδο 2016–2024.

Η ανάλυση ανέδειξε ένα κυρίαρχο θετικό θερμοκρασιακό πρότυπο, το οποίο όμως δεν εκφράστηκε με την ίδια ένταση σε όλες τις θέσεις και τις εποχές. Από τους δεκαέξι εξεταζόμενους συνδυασμούς σταθμού και εποχής, οι δεκαπέντε παρουσίασαν θετική κλίση, γεγονός που δείχνει ότι οι υψηλότερες ημερήσιες θερμοκρασίες συνοδεύονταν γενικά από υψηλότερες συγκεντρώσεις PM₁₀. Η συνοχή αυτού του προτύπου ήταν εντονότερη κατά το καλοκαίρι.

Η θερινή περίοδος αποτέλεσε το σαφέστερο κοινό στοιχείο μεταξύ των σταθμών. Στην Ελευσίνα, στη Λυκόβρυση και στους Θρακομακεδόνες καταγράφηκαν σχεδόν ισοδύναμες συσχετίσεις, με $r=0,488$, $r=0,485$ και $r=0,476$, αντίστοιχα. Τα αντίστοιχα μοντέλα απέδωσαν περίπου το 23% της ημερήσιας μεταβλητότητας των PM₁₀ ($R^2=0,238$, $0,235$ και

0,226). Η σύγκλιση των αποτελεσμάτων σε τρεις σταθμούς διαφορετικών χαρακτηριστικών υποδηλώνει ότι η θερινή θετική σχέση δεν αποτελεί μεμονωμένο τοπικό εύρημα. Στην Αριστοτέλους η κατεύθυνση ήταν επίσης θετική, αλλά αισθητά ασθενέστερη ($r=0,222$, $R^2=0,049$).

Κατά τον χειμώνα διαμορφώθηκαν δύο διακριτές χωρικές συμπεριφορές. Η Ελευσίνα και οι Θρακομακεδόνες εμφάνισαν σχετικά συνεκτικές θετικές σχέσεις, με $r=0,407$ και $r=0,417$, ενώ τα μοντέλα απέδωσαν το 16,6% και το 17,4% της μεταβλητότητας των συγκεντρώσεων. Αντίθετα, στην Αριστοτέλους η σχέση ήταν ασθενέστερη ($r=0,228$, $R^2=0,052$), ενώ στη Λυκόβρυση ήταν οριακή από πρακτική άποψη, παρά τη στατιστική σημαντικότητά της ($r=0,083$, $R^2=0,007$, $p=0,023$). Η διαφοροποίηση αυτή δείχνει ότι η χειμερινή σύνδεση θερμοκρασίας- PM_{10} εξαρτάται περισσότερο από τα χαρακτηριστικά της θέσης μέτρησης.

Η άνοιξη χαρακτηρίστηκε από ασθενέστερες σχέσεις στο σύνολο των σταθμών. Οι τιμές του r κυμάνθηκαν από 0,160 στη Λυκόβρυση έως 0,227 στην Ελευσίνα και οι τιμές του R^2 δεν υπερέβησαν το 0,052. Παρότι οι σχέσεις ήταν στατιστικά σημαντικές, η μικρή τους ερμηνευτική ικανότητα δείχνει ότι η θερμοκρασία δεν αποτύπωνε παρά περιορισμένο μέρος της ημερήσιας διακύμανσης των PM_{10} κατά τη συγκεκριμένη εποχή.

Το φθινόπωρο παρουσίασε τη μεγαλύτερη χωρική διαφοροποίηση. Στους Θρακομακεδόνες διατηρήθηκε σαφής θετική σχέση ($r=0,361$, $R^2=0,131$), ενώ στην Ελευσίνα η ένταση ήταν μικρότερη ($r=0,284$, $R^2=0,081$). Στη Λυκόβρυση η σχέση εξασθένησε σημαντικά ($r=0,151$, $R^2=0,023$), ενώ στην Αριστοτέλους δεν προέκυψε στατιστικά τεκμηριωμένη γραμμική σύνδεση ($r=0,051$, $R^2=0,003$, $p=0,179$). Η σύγκριση των εποχών υποδεικνύει ότι η θερμοκρασία συνδέθηκε πιο συστηματικά με τα PM_{10} κατά το καλοκαίρι, ενώ την άνοιξη και το φθινόπωρο η σχέση εξασθένησε ή διαφοροποιήθηκε περισσότερο μεταξύ των σταθμών. Η μέγιστη τιμή του R^2 , ίση με 0,238, σημαίνει ότι ακόμη και το ισχυρότερο μοντέλο απέδωσε λιγότερο από το ένα τέταρτο της συνολικής ημερήσιας μεταβλητότητας των συγκεντρώσεων.

Επομένως, η θερμοκρασία συνδέεται μεν με τη διακύμανση των PM_{10} , αλλά δεν αποτελεί επαρκή μεμονωμένο παράγοντα για την ερμηνεία τους. Η υπολειπόμενη μεταβλητότητα είναι πιθανό να αντανakλά την επίδραση της ατμοσφαιρικής διασποράς, της ταχύτητας και της διεύθυνσης του ανέμου, της υγρασίας και της βροχόπτωσης, καθώς και μεταβολών στις τοπικές εκπομπές ή στην περιφερειακή μεταφορά σωματιδίων. Τα αποτελέσματα τεκμηριώνουν συνεπώς μια κυρίως θετική, αλλά σαφώς εποχικά και χωρικά

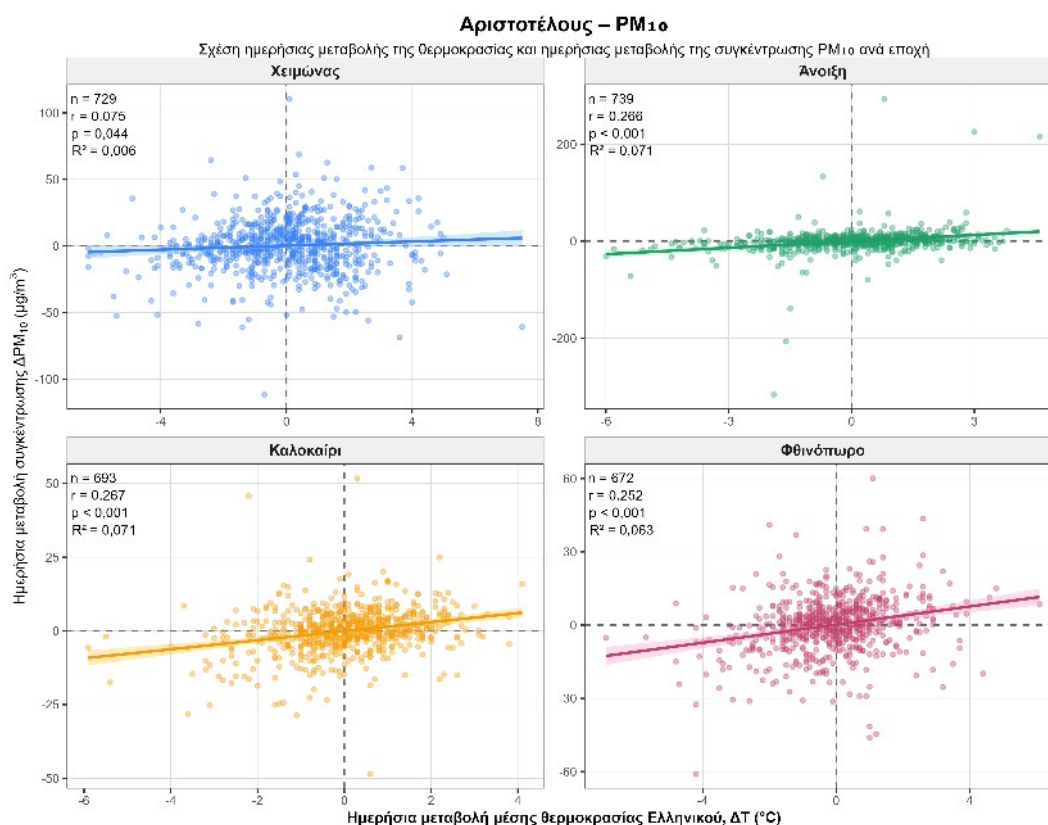
τροποποιούμενη γραμμική σχέση, χωρίς να υποστηρίζουν αυτοτελή αιτιώδη επίδραση της θερμοκρασίας στις συγκεντρώσεις PM_{10} .

4.8.2 Σχέση ημερήσιας μεταβολής της θερμοκρασίας και ημερήσιας μεταβολής της συγκέντρωσης PM_{10} ανά εποχή και σταθμό

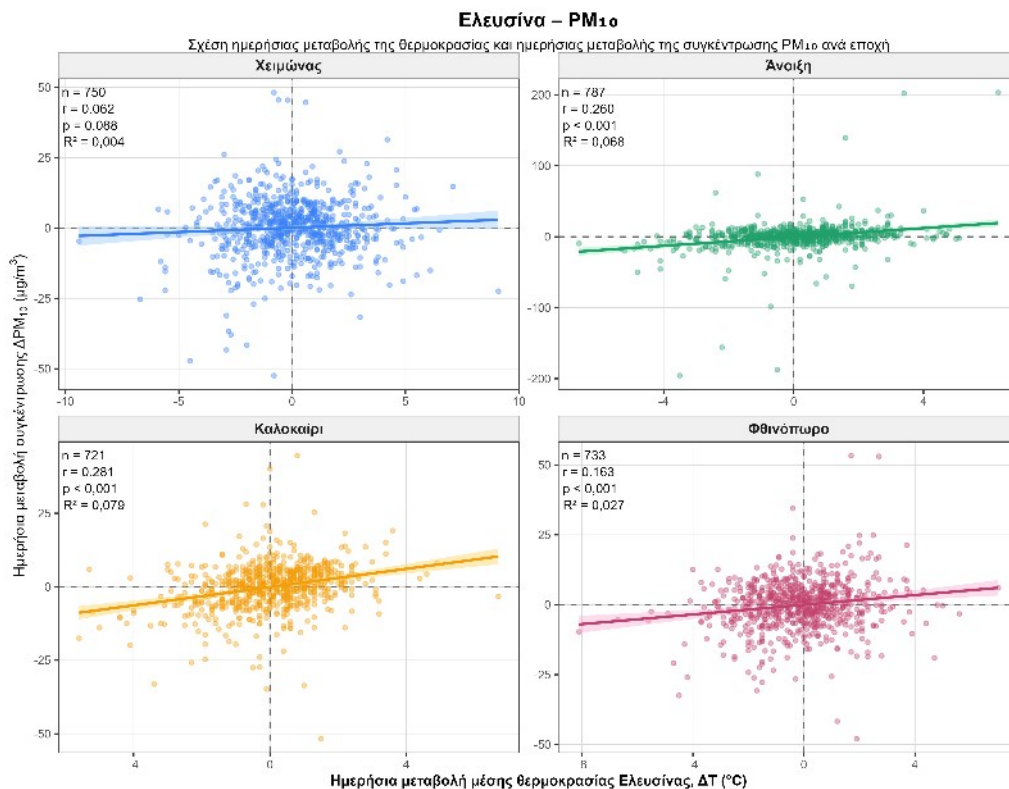
Η ανάλυση των πρώτων διαφορών χρησιμοποιήθηκε για να εξεταστεί εάν οι μεταβολές της θερμοκρασίας από τη μία ημέρα στην επόμενη συνοδεύονταν από παράλληλες μεταβολές των συγκεντρώσεων PM_{10} . Με τον τρόπο αυτό, η διερεύνηση μετατοπίστηκε από τη σύγκριση των απόλυτων ημερήσιων επιπέδων στη βραχυχρόνια δυναμική των δύο μεταβλητών.

Συμπεριλήφθηκαν αποκλειστικά ζεύγη πραγματικά διαδοχικών ημερομηνιών με ταυτόχρονα έγκυρες μετρήσεις θερμοκρασίας και PM_{10} . Για κάθε συνδυασμό σταθμού και εποχής προσαρμόστηκε απλό γραμμικό μοντέλο μεταξύ της ημερήσιας μεταβολής της μέσης θερμοκρασίας, ΔT , και της αντίστοιχης μεταβολής της συγκέντρωσης, ΔPM_{10} . Εκτιμήθηκαν ο αριθμός των παρατηρήσεων, ο συντελεστής συσχέτισης Pearson r , η κλίση β , το 95% διάστημα εμπιστοσύνης της, η τιμή p και ο συντελεστής προσδιορισμού R^2 .

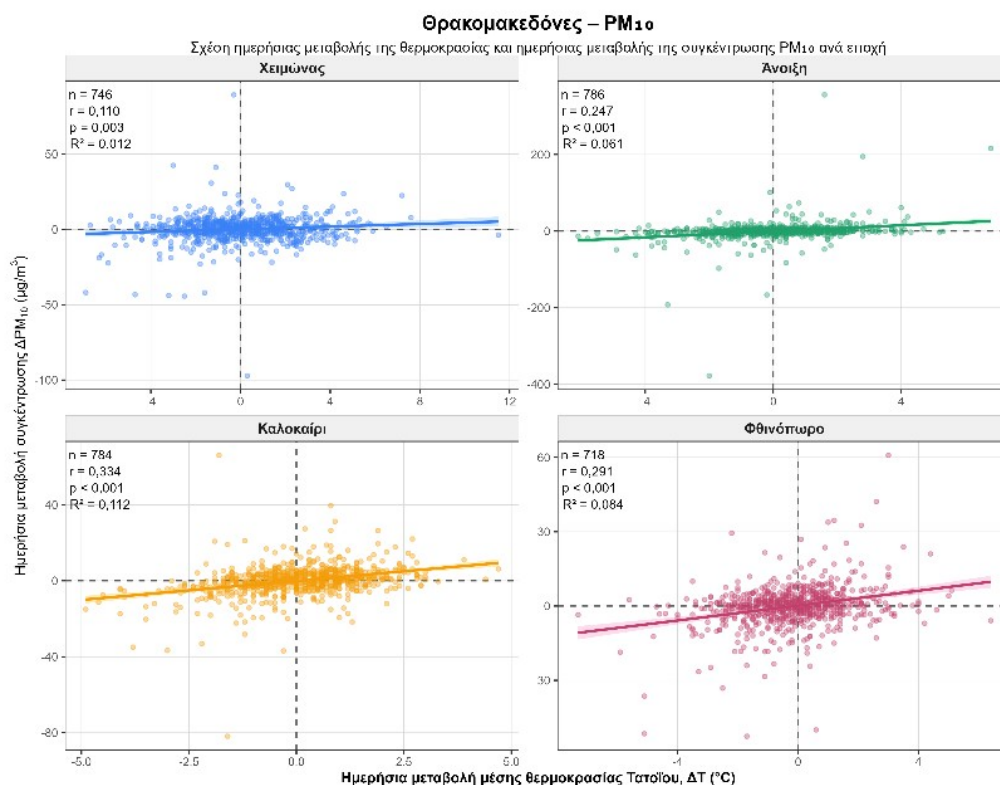
Τα αποτελέσματα απεικονίζονται στα Σχήματα 4.59–4.62.



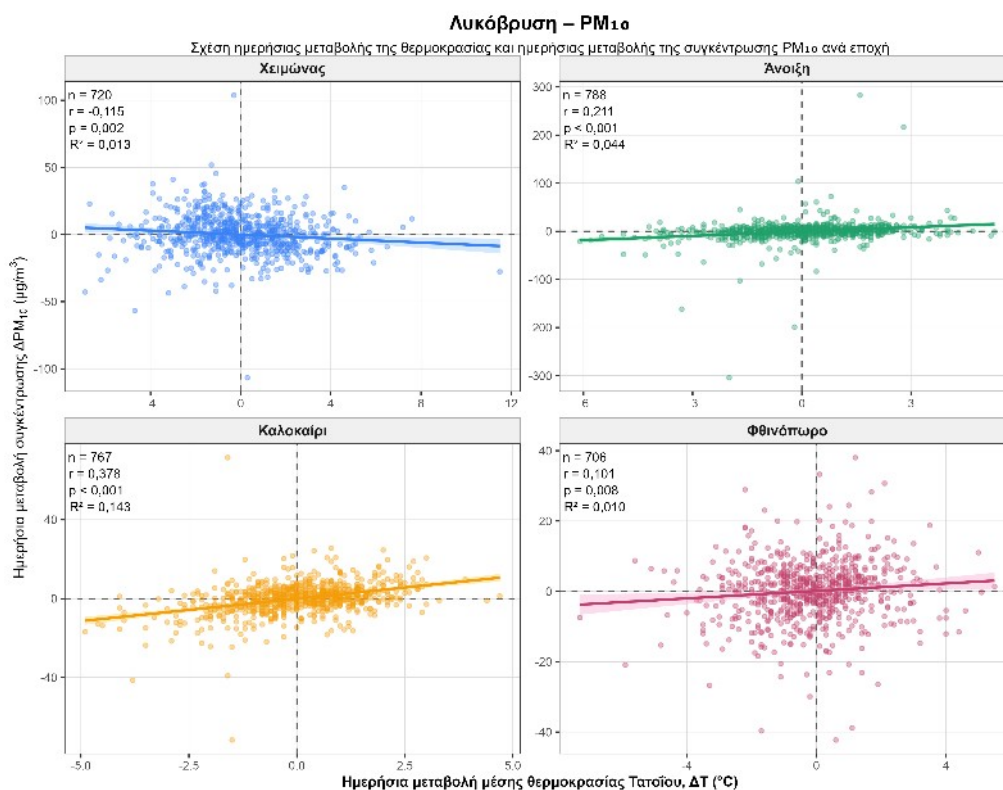
Σχήμα 4.59. Σχέση μεταξύ της ημερήσιας μεταβολής της μέσης θερμοκρασίας και της ημερήσιας μεταβολής της συγκέντρωσης PM₁₀ ανά εποχή στον **σταθμό Αριστοτέλους** κατά την περίοδο 2016–2024.



Σχήμα 4.60. Σχέση μεταξύ της ημερήσιας μεταβολής της μέσης θερμοκρασίας και της ημερήσιας μεταβολής της συγκέντρωσης PM₁₀ ανά εποχή στον **σταθμό Ελευσίνας** κατά την περίοδο 2016–2024.



Σχήμα 4.61. Σχέση μεταξύ της ημερήσιας μεταβολής της μέσης θερμοκρασίας και της ημερήσιας μεταβολής της συγκέντρωσης PM₁₀ ανά εποχή στον **σταθμό Θρακομακεδόνων** κατά την περίοδο 2016–2024.



Σχήμα 4.62. Σχέση μεταξύ της ημερήσιας μεταβολής της μέσης θερμοκρασίας και της ημερήσιας μεταβολής της συγκέντρωσης PM₁₀ ανά εποχή στον **σταθμό Λυκόβρυσης** κατά την περίοδο 2016–2024.

Τα αποτελέσματα ανέδειξαν σαφή μεταβολή της βραχυχρόνιας σχέσης κατά τη διάρκεια του έτους. Το θερμοκρασιακό σήμα ήταν ασθενές και χωρικά ασυνεπές τον χειμώνα, έγινε ομοιόμορφα θετικό την άνοιξη, ενισχύθηκε κατά το καλοκαίρι και διατηρήθηκε με μικρότερη και περισσότερο διαφοροποιημένη ένταση το φθινόπωρο.

Η χειμερινή περίοδος χαρακτηρίστηκε από πρακτικά αμελητέες γραμμικές σχέσεις. Στην Αριστοτέλους, στην Ελευσίνα και στους Θρακομακεδόνες οι τιμές του r παρέμειναν μεταξύ 0,062 και 0,110 και τα μοντέλα απέδωσαν το πολύ το 1,2% της μεταβλητότητας της ΔPM_{10} . Στη Λυκόβρυση η κατεύθυνση αντιστράφηκε, με $r=-0,115$ και $R^2=0,013$. Παρά τη στατιστική σημαντικότητα ορισμένων εκτιμήσεων, τα μεγέθη αυτά δεν υποστηρίζουν ουσιαστική βραχυχρόνια σύνδεση κατά τον χειμώνα.

Την άνοιξη προέκυψε περισσότερο συνεκτική χωρική εικόνα. Και στους τέσσερις σταθμούς καταγράφηκαν θετικές και στατιστικά σημαντικές σχέσεις, με τιμές του r από 0,211 στη Λυκόβρυση έως 0,266 στην Αριστοτέλους. Η ομοιότητα των συντελεστών δείχνει κοινή κατεύθυνση της συνδιακύμανσης, χωρίς όμως υψηλή προγνωστική ισχύ, καθώς οι τιμές του R^2 κυμάνθηκαν μόνο από 0,044 έως 0,071.

Το θερινό διάστημα αποτέλεσε τη σαφέστερη φάση ενίσχυσης της σχέσης. Η μεγαλύτερη συσχέτιση καταγράφηκε στη Λυκόβρυση, με $r=0,378$ και $R^2=0,143$, και ακολούθησαν οι Θρακομακεδόνες με $r=0,334$ και $R^2=0,112$. Στην Ελευσίνα και στην Αριστοτέλους οι σχέσεις ήταν ασθενέστερες αλλά παρέμειναν θετικές και στατιστικά σημαντικές. Επομένως, κατά το καλοκαίρι, μια θετικότερη ημερήσια μεταβολή της θερμοκρασίας συνδεόταν συχνότερα με θετικότερη μεταβολή των PM_{10} σε ολόκληρο το εξεταζόμενο δίκτυο.

Κατά το φθινόπωρο το θετικό πρόσημο διατηρήθηκε, αλλά η χωρική συνοχή μειώθηκε. Οι Θρακομακεδόνες παρουσίασαν τη μεγαλύτερη συσχέτιση, με $r=0,291$ και $R^2=0,084$, ενώ ακολούθησε η Αριστοτέλους με $r=0,252$ και $R^2=0,063$. Στην Ελευσίνα και κυρίως στη Λυκόβρυση η σχέση εξασθένησε αισθητά, με τιμές του R^2 ίσες με 0,027 και 0,010 αντίστοιχα. Η εποχική ακολουθία των αποτελεσμάτων υποδηλώνει ότι η βραχυχρόνια συνδιακύμανση $\Delta T-\Delta PM_{10}$ δεν είναι σταθερή, αλλά ενισχύεται κυρίως κατά την άνοιξη και το καλοκαίρι. Η μεγαλύτερη ερμηνευτική ικανότητα καταγράφηκε στη Λυκόβρυση κατά

τη θερινή περίοδο, ωστόσο ακόμη και εκεί το μοντέλο απέδωσε μόνο το 14,3% της μεταβλητότητας της ΔPM_{10} . Η εκτεταμένη συγκέντρωση των παρατηρήσεων κοντά στο σημείο (0,0)(0,0)(0,0), σε συνδυασμό με την παρουσία μεμονωμένων επεισοδίων ιδιαίτερα μεγάλων μεταβολών των PM_{10} , δείχνει ότι η ημερήσια θερμοκρασιακή μεταβολή δεν επαρκεί για την αποτύπωση της πλήρους βραχυχρόνιας δυναμικής του ρύπου. Μεταβολές στις εκπομπές, στην ταχύτητα και τη διεύθυνση του ανέμου, στη βροχόπτωση, στη σταθερότητα της ατμόσφαιρας και στην περιφερειακή μεταφορά σωματιδίων είναι πιθανό να συνεισφέρουν σημαντικά στην υπολειπόμενη διακύμανση. Η εικόνα που προέκυψε δείχνει ότι η θετική βραχυχρόνια σχέση μεταξύ ΔT και ΔPM_{10} ενισχύεται κυρίως κατά την άνοιξη και το καλοκαίρι, ενώ τον χειμώνα παραμένει πολύ ασθενής και χωρίς κοινή χωρική κατεύθυνση. Παρά τη μεγαλύτερη συνοχή των θερμότερων εποχών, οι χαμηλές τιμές του R^2 δείχνουν ότι η ημερήσια μεταβολή της θερμοκρασίας εξηγεί μόνο περιορισμένο μέρος της μεταβλητότητας των PM_{10} . Η σχέση, επομένως, είναι εποχικά εξαρτώμενη και χωρικά διαφοροποιημένη και δεν αρκεί για την τεκμηρίωση αυτοτελούς γραμμικής επίδρασης της ΔT στη ΔPM_{10} .

4.8.3 Κατανομή της ημερήσιας μεταβολής της συγκέντρωσης PM_{10} ανά κατηγορία ημερήσιας μεταβολής της θερμοκρασίας

Η έντονη μεταβλητότητα των PM_{10} και η προέλευσή τους από διαφορετικές φυσικές και ανθρωπογενείς πηγές καθιστούν χρήσιμη την εξέταση της ΔPM_{10} πέρα από τη συνολική γραμμική σχέση με τη ΔT . Για τον λόγο αυτό, οι ημερήσιες μεταβολές της θερμοκρασίας ταξινομήθηκαν σε πέντε κατηγορίες, ώστε να διερευνηθεί αν ημέρες με διαφορετική ένταση και κατεύθυνση θερμοκρασιακής μεταβολής συνοδεύονται από διακριτές μεταβολές στη θέση, στη διασπορά και στο εύρος των τιμών της ΔPM_{10} . Η προσέγγιση αυτή λειτουργεί συμπληρωματικά προς την προηγούμενη ανάλυση, στην οποία η ΔT εξετάστηκε ως συνεχής μεταβλητή.

Οι κατηγορίες της ημερήσιας μεταβολής της θερμοκρασίας ορίστηκαν ως εξής:

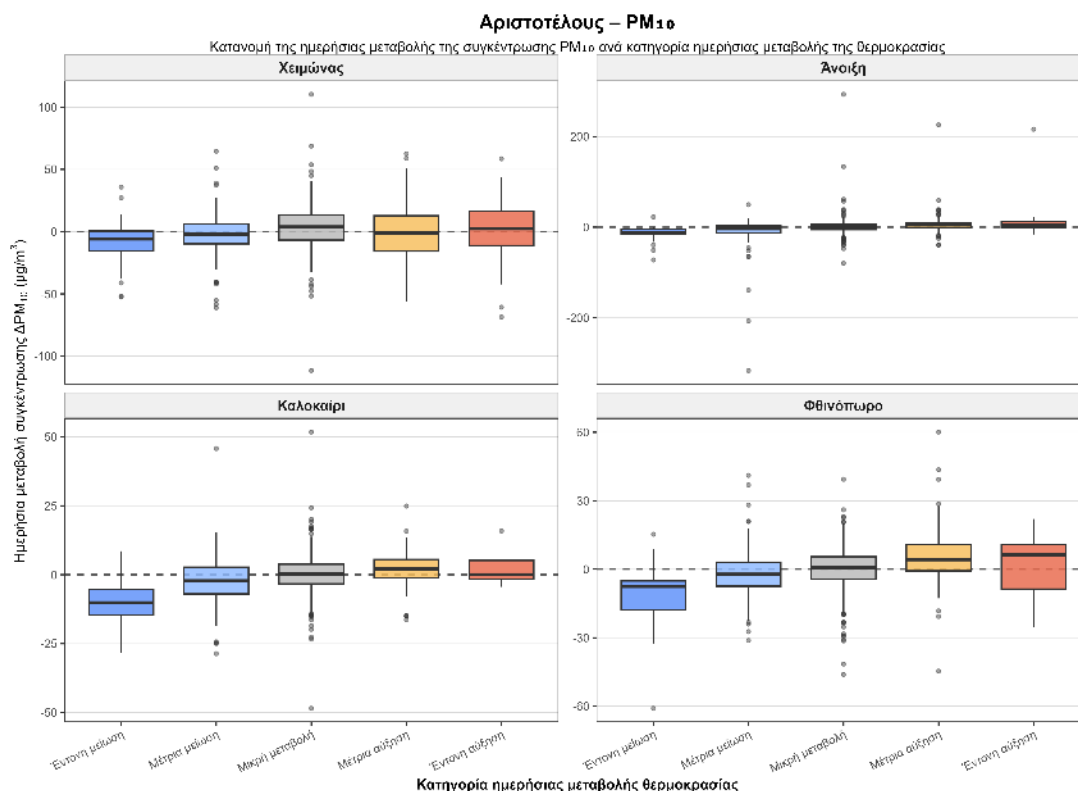
- ισχυρή μείωση: $\Delta T < -3 \text{ }^{\circ}\text{C}$,
- μέτρια μείωση: $-3 \text{ }^{\circ}\text{C} \leq \Delta T < -1 \text{ }^{\circ}\text{C}$,
- μικρή μεταβολή: $-1 \text{ }^{\circ}\text{C} \leq \Delta T < 1 \text{ }^{\circ}\text{C}$,
- μέτρια αύξηση: $1 \text{ }^{\circ}\text{C} \leq \Delta T < 3 \text{ }^{\circ}\text{C}$,

- ισχυρή αύξηση: $\Delta T \geq 3 \text{ }^{\circ}\text{C}$.

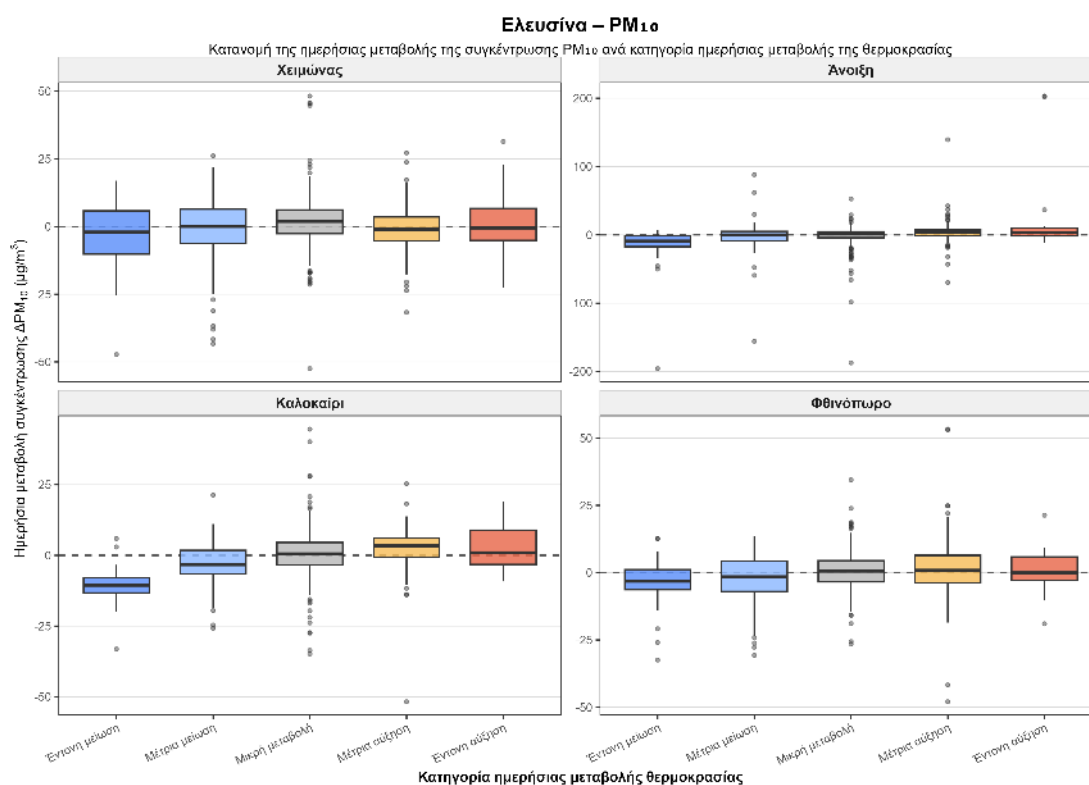
Η ανάλυση πραγματοποιήθηκε χωριστά ανά εποχή και σταθμό και βασίστηκε αποκλειστικά σε ζεύγη πραγματικά διαδοχικών ημερών με ταυτόχρονα έγκυρες παρατηρήσεις θερμοκρασίας και PM_{10} . Έτσι, οι υπολογιζόμενες μεταβολές αντιστοιχούν σε πραγματικές ημερήσιες διαφορές και δεν επηρεάζονται από κενά στις χρονοσειρές.

Για κάθε κατηγορία ΔT , η κατανομή της ΔPM_{10} αποτυπώθηκε με διαγράμματα πλαισίου και απολήξεων. Η αξιολόγηση επικεντρώθηκε στη μετατόπιση των διαμέσων, στο εύρος και στη διασπορά των παρατηρήσεων, καθώς και στον βαθμό επικάλυψης μεταξύ των κατηγοριών. Με τον τρόπο αυτό διερευνήθηκε αν οι αυξήσεις ή οι μειώσεις της θερμοκρασίας συνδέονται με συνεπή μεταβολή των PM_{10} ή αν η απόκριση παραμένει ετερογενής, όπως θα αναμενόταν λόγω της σύνθετης προέλευσης του ρύπου.

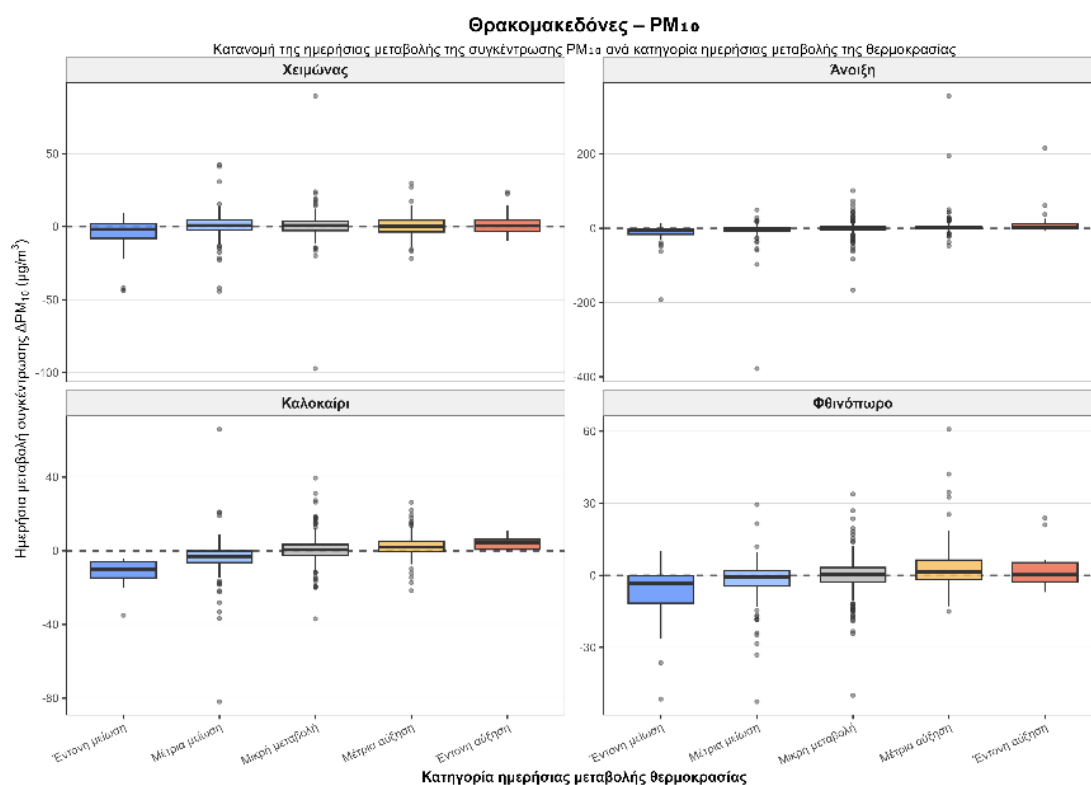
Τα αποτελέσματα παρουσιάζονται στα Σχήματα 4.63–4.66.



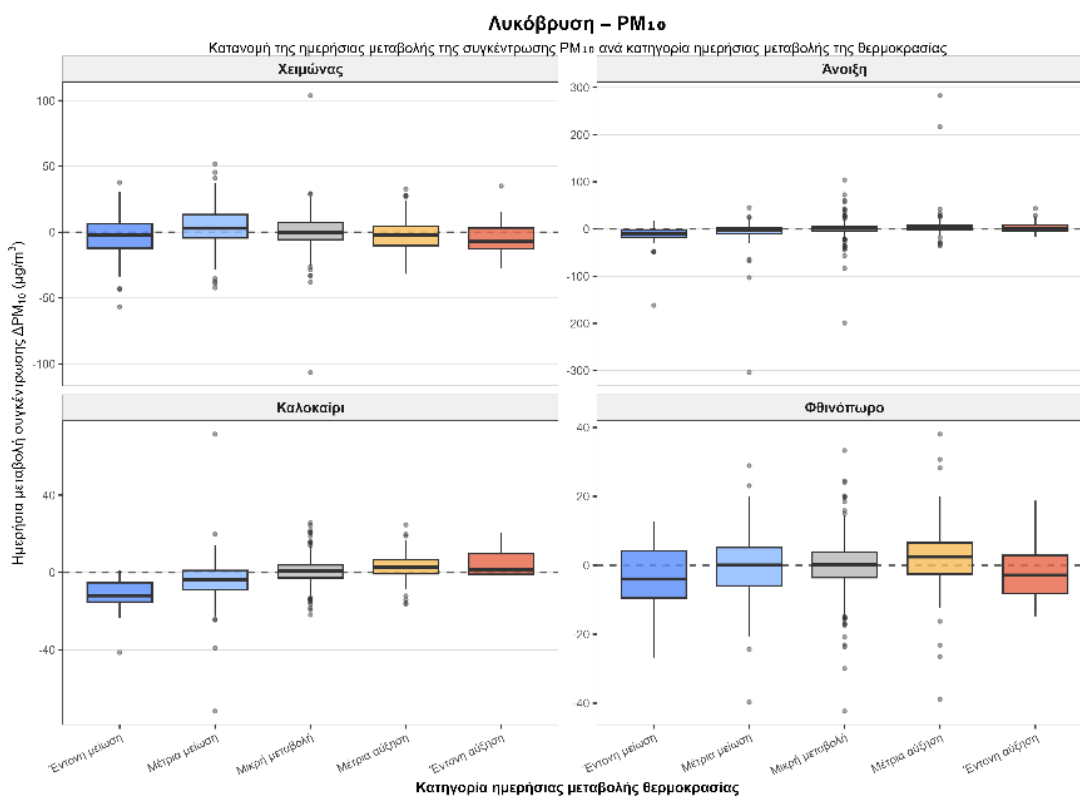
Σχήμα 4.63. Κατανομή της ημερήσιας μεταβολής της συγκέντρωσης PM_{10} ανά κατηγορία ημερήσιας μεταβολής της μέσης θερμοκρασίας και εποχή στον **σταθμό Αριστοτέλους** κατά την περίοδο 2016–2024.



Σχήμα 4.64. Κατανομή της ημερήσιας μεταβολής της συγκέντρωσης PM₁₀ ανά κατηγορία ημερήσιας μεταβολής της μέσης θερμοκρασίας και εποχή στον **σταθμό Ελευσίνας** κατά την περίοδο 2016–2024.



Σχήμα 4.65. Κατανομή της ημερήσιας μεταβολής της συγκέντρωσης PM₁₀ ανά κατηγορία ημερήσιας μεταβολής της μέσης θερμοκρασίας και εποχή στον **σταθμό Θρακομακεδόνων** κατά την περίοδο 2016–2024.



Σχήμα 4.66. Κατανομή της ημερήσιας μεταβολής της συγκέντρωσης PM₁₀ ανά κατηγορία ημερήσιας μεταβολής της μέσης θερμοκρασίας και εποχή στον **σταθμό Λυκόβρυσης** κατά την περίοδο 2016–2024.

Σημείωση: Η κεντρική γραμμή κάθε πλαισίου αντιστοιχεί στη διάμεσο και το πλαίσιο στο ενδοτεταρτημοριακό εύρος. Οι απολήξεις αποτυπώνουν το εύρος των τιμών εντός των αντίστοιχων ορίων, ενώ τα μεμονωμένα σημεία αντιπροσωπεύουν παρατηρήσεις εκτός των απολήξεων. Η διακεκομμένη οριζόντια γραμμή δηλώνει μηδενική ημερήσια μεταβολή της συγκέντρωσης PM_{10} .

Η επισκόπηση των Σχημάτων 4.63–4.66 δείχνει ότι η κατεύθυνση της θερμοκρασιακής μεταβολής συνδέθηκε κυρίως με μετατόπιση της κεντρικής τάσης της ΔPM_{10} και όχι με πλήρη διαχωρισμό των επιμέρους κατανομών. Σε αρκετές περιπτώσεις οι διάμεσοι μετακινήθηκαν από αρνητικές προς θετικότερες τιμές καθώς η ΔT μεταβαλλόταν από την έντονη μείωση προς την αύξηση. Παράλληλα, η σημαντική επικάλυψη των πλαισίων και των απολήξεων δείχνει ότι η θερμοκρασιακή κατηγορία δεν επαρκούσε για να διακρίνει σαφώς τις ημερήσιες μεταβολές των PM_{10} .

Το συνεπέστερο πρότυπο καταγράφηκε κατά το καλοκαίρι. Και στους τέσσερις σταθμούς, η κατηγορία έντονης μείωσης της θερμοκρασίας εμφάνισε αρνητική διάμεσο της ΔPM_{10} . Καθώς οι κατηγορίες μετακινούνταν προς τη μικρή μεταβολή και τις αυξήσεις της θερμοκρασίας, οι διάμεσοι προσέγγιζαν τη μηδενική τιμή ή μετατοπίζονταν στη θετική περιοχή. Η διαβάθμιση ήταν περισσότερο εμφανής στους Θρακομακεδόνες και στη Λυκόβρυση, ενώ στην Αριστοτέλους και στην Ελευσίνα ήταν ηπιότερη.

Κατά την άνοιξη διατηρήθηκε η ίδια γενική κατεύθυνση, αλλά η παρουσία ακραίων ημερήσιων μεταβολών αύξησε σημαντικά το εύρος των κατανομών. Οι κατηγορίες μείωσης της θερμοκρασίας παρουσίασαν συνήθως αρνητικότερες διαμέσους, ενώ οι κατηγορίες αύξησης μετατοπίστηκαν προς θετικότερες τιμές. Ωστόσο, η σειρά των ενδιάμεσων κατηγοριών δεν ήταν πάντοτε αυστηρά μονοτονική και η εκτεταμένη επικάλυψη περιορίσε τη διακριτική ικανότητα της κατηγοριοποίησης.

Το φθινόπωρο εμφάνισε μεγαλύτερη χωρική διαφοροποίηση. Στην Αριστοτέλους και στους Θρακομακεδόνες διακρίθηκε σχετικά ομαλή μετάβαση από αρνητικότερες τιμές στις κατηγορίες μείωσης προς θετικότερες τιμές στις κατηγορίες αύξησης. Στην Ελευσίνα οι περισσότερες διάμεσοι παρέμειναν κοντά στη μηδενική μεταβολή και οι μεταξύ τους αποκλίσεις ήταν μικρότερες. Στη Λυκόβρυση η διάταξη δεν ήταν μονοτονική, καθώς η μέτρια αύξηση παρουσίασε θετικότερη διάμεσο, ενώ η έντονη αύξηση μετατοπίστηκε εκ νέου προς αρνητικές τιμές.

Η χειμερινή περίοδος παρουσίασε τη χαμηλότερη συνοχή μεταξύ των σταθμών. Στην Αριστοτέλους, στην Ελευσίνα και στους Θρακομακεδόνες οι διάμεσοι παρέμειναν ως επί το πλείστον κοντά στη μηδενική τιμή, χωρίς σταθερή διαβάθμιση μεταξύ των κατηγοριών. Στη Λυκόβρυση, αντίθετα, οι κατηγορίες αύξησης της θερμοκρασίας εμφάνισαν αρνητικότερες διαμέσους από την κατηγορία μέτριας μείωσης. Η εικόνα αυτή συμφωνεί με την ασθενή αρνητική χειμερινή συσχέτιση που είχε καταγραφεί όταν η ΔΤ εξετάστηκε ως συνεχής μεταβλητή.

Πέρα από τη μετατόπιση της διαμέσου, τα διαγράμματα ανέδειξαν σημαντικές διαφοροποιήσεις και ως προς τη μεταβλητότητα. Σε αρκετούς συνδυασμούς εποχής και σταθμού, οι ακραίες κατηγορίες της ΔΤ παρουσίασαν ευρύτερα πλαίσια ή μεγαλύτερες απολήξεις, υποδηλώνοντας αυξημένη διασπορά της ΔPM_{10} κατά τις εντονότερες θερμοκρασιακές μεταβολές. Οι πολυάριθμες παρατηρήσεις εκτός των απολήξεων, ιδιαίτερα κατά την άνοιξη, καταδεικνύουν επίσης την παρουσία επεισοδίων μεταβολής των PM_{10} τα οποία δεν μπορούν να αποδοθούν μόνο στη μεταβολή της θερμοκρασίας.

Η κατηγοριοποιημένη ανάλυση ενίσχυσε την εικόνα μιας έντονα εποχικά εξαρτώμενης βραχυχρόνιας σχέσης μεταξύ ΔΤ και ΔPM_{10} . Το καλοκαίρι παρουσίασε το συνεπέστερο χωρικό πρότυπο μετάβασης από αρνητικότερες προς θετικότερες μεταβολές των PM_{10} , ενώ τον χειμώνα η διάταξη των κατηγοριών ήταν ασθενέστερη και λιγότερο ομοιόμορφη. Ωστόσο, η μεγάλη επικάλυψη των κατανομών δείχνει ότι η κατηγορία της ΔΤ αποτυπώνει μόνο μέρος της ημερήσιας μεταβλητότητας των PM_{10} . Επομένως, τα διαγράμματα υποστηρίζουν μια περιγραφική διαφοροποίηση της κεντρικής τάσης, χωρίς να τεκμηριώνουν από μόνα τους σαφή στατιστικό διαχωρισμό μεταξύ όλων των κατηγοριών.

4.8.4 Συγκριτική παρουσίαση των αποτελεσμάτων για τα PM_{10}

Η συγκεντρωτική αξιολόγηση των αποτελεσμάτων επιτρέπει τη διάκριση δύο συμπληρωματικών όψεων της σχέσης θερμοκρασίας- PM_{10} . Η ανάλυση των ημερήσιων μέσων τιμών αποτυπώνει τη συνδιακύμανση των απόλυτων επιπέδων των δύο μεταβλητών μέσα σε κάθε εποχή, ενώ η ανάλυση των ημερήσιων διαφορών επικεντρώνεται στη βραχυχρόνια μεταβολή τους από τη μία ημέρα στην επόμενη. Η διάκριση αυτή είναι ουσιώδης, επειδή μια σχέση που εμφανίζεται στα ημερήσια επίπεδα δεν είναι αναγκαίο να

διατηρείται με την ίδια ένταση όταν αφαιρούνται οι βραδύτερες χρονικές μεταβολές και εξετάζονται αποκλειστικά οι πρώτες διαφορές.

Για κάθε συνδυασμό σταθμού και εποχής παρουσιάζονται ο αριθμός των παρατηρήσεων, ο συντελεστής συσχέτισης Pearson, η μη τυποποιημένη κλίση της απλής γραμμικής παλινδρόμησης, το 95% διάστημα εμπιστοσύνης της κλίσης, η τιμή στατιστικής σημαντικότητας και ο συντελεστής προσδιορισμού R^2 . Τα αποτελέσματα της ανάλυσης των ημερήσιων μέσων τιμών και των ημερήσιων μεταβολών παρατίθενται αντίστοιχα στους Πίνακες 4.10 και 4.11.

Πίνακας 4.10. Συγκεντρωτικά αποτελέσματα της σχέσης μεταξύ της ημερήσιας μέσης θερμοκρασίας και της ημερήσιας μέσης συγκέντρωσης PM_{10} ανά σταθμό και εποχή, κατά την περίοδο 2016–2024.							
Σταθμός	Εποχή	n	r	β_1	95% ΔΕ	p	R^2
Αριστοτέλους	Χειμώνας	756	0,228	1,351	[0,938, 1,765]	< 0,001	0,052
Αριστοτέλους	Άνοιξη	771	0,183	1,042	[0,647, 1,438]	< 0,001	0,034
Αριστοτέλους	Καλοκαίρι	734	0,222	0,881	[0,600, 1,161]	< 0,001	0,049
Αριστοτέλους	Φθινόπωρο	699	0,051	0,165	[-0,075, 0,405]	0,179	0,003
Ελευσίνα	Χειμώνας	761	0,407	1,411	[1,186, 1,637]	< 0,001	0,166
Ελευσίνα	Άνοιξη	796	0,227	0,944	[0,662, 1,225]	< 0,001	0,052
Ελευσίνα	Καλοκαίρι	739	0,488	1,699	[1,479, 1,919]	< 0,001	0,238
Ελευσίνα	Φθινόπωρο	745	0,284	0,695	[0,526, 0,864]	< 0,001	0,081
Θρακομακεδόνες	Χειμώνας	760	0,417	1,190	[1,005, 1,375]	< 0,001	0,174
Θρακομακεδόνες	Άνοιξη	797	0,220	1,097	[0,759, 1,436]	< 0,001	0,048
Θρακομακεδόνες	Καλοκαίρι	798	0,476	1,614	[1,407, 1,822]	< 0,001	0,226
Θρακομακεδόνες	Φθινόπωρο	728	0,361	0,827	[0,672, 0,983]	< 0,001	0,131
Λυκόβρυση	Χειμώνας	742	0,083	0,372	[0,050, 0,693]	0,023	0,007
Λυκόβρυση	Άνοιξη	804	0,160	0,745	[0,427, 1,064]	< 0,001	0,026
Λυκόβρυση	Καλοκαίρι	786	0,485	1,684	[1,471, 1,897]	< 0,001	0,235
Λυκόβρυση	Φθινόπωρο	728	0,151	0,357	[0,187, 0,527]	< 0,001	0,023

Πίνακας 4.10 Συγκεντρωτικά αποτελέσματα της απλής γραμμικής παλινδρόμησης μεταξύ της ημερήσιας μέσης θερμοκρασίας και της ημερήσιας μέσης συγκέντρωσης PM_{10} , ανά σταθμό και εποχή, κατά την περίοδο 2016–2024.

Πίνακας 4.11. Συγκενρωτικά αποτελέσματα της σχέσης μεταξύ της ημερήσιας μεταβολής της θερμοκρασίας (ΔT) και της ημερήσιας μεταβολής της συγκέντρωσης PM_{10} (ΔPM_{10}) ανά σταθμό και εποχή, κατά την περίοδο 2016–2024.

Σταθμός	Εποχή	n	r	β_1	95% ΔΕ	p	R ²
Αριστοτέλους	Χειμώνας	729	0,075	0,767	[0,022, 1,512]	0,044	0,006
Αριστοτέλους	Άνοιξη	739	0,266	4,406	[3,250, 5,563]	< 0,001	0,071
Αριστοτέλους	Καλοκαίρι	693	0,267	1,533	[1,119, 1,946]	< 0,001	0,071
Αριστοτέλους	Φθινόπωρο	672	0,252	1,856	[1,315, 2,397]	< 0,001	0,063
Ελευσίνα	Χειμώνας	750	0,062	0,310	[-0,047, 0,666]	0,088	0,004
Ελευσίνα	Άνοιξη	787	0,260	3,122	[2,310, 3,935]	< 0,001	0,068
Ελευσίνα	Καλοκαίρι	721	0,281	1,555	[1,167, 1,943]	< 0,001	0,079
Ελευσίνα	Φθινόπωρο	733	0,163	0,866	[0,486, 1,247]	< 0,001	0,027
Θρακομακεδόνες	Χειμώνας	746	0,110	0,439	[0,153, 0,724]	0,003	0,012
Θρακομακεδόνες	Άνοιξη	786	0,247	3,922	[2,842, 5,003]	< 0,001	0,061
Θρακομακεδόνες	Καλοκαίρι	784	0,334	2,006	[1,609, 2,403]	< 0,001	0,112
Θρακομακεδόνες	Φθινόπωρο	718	0,291	1,505	[1,141, 1,868]	< 0,001	0,084
Λυκόβρυση	Χειμώνας	720	-0,115	-0,742	[-1,211, -0,273]	0,002	0,013
Λυκόβρυση	Άνοιξη	788	0,211	2,971	[2,006, 3,937]	< 0,001	0,044
Λυκόβρυση	Καλοκαίρι	767	0,378	2,271	[1,877, 2,666]	< 0,001	0,143
Λυκόβρυση	Φθινόπωρο	706	0,101	0,532	[0,143, 0,922]	0,008	0,010

Πίνακας 4.11 Συγκενρωτικά αποτελέσματα της απλής γραμμικής παλινδρόμησης μεταξύ της ημερήσιας μεταβολής της μέσης θερμοκρασίας και της ημερήσιας μεταβολής της συγκέντρωσης PM_{10} , ανά σταθμό και εποχή, κατά την περίοδο 2016–2024.

Σημείωση: n = αριθμός παρατηρήσεων, r = συντελεστής συσχέτισης Pearson, β = κλίση της απλής γραμμικής παλινδρόμησης, 95% ΔΕ = 95% διάστημα εμπιστοσύνης της κλίσης, p = τιμή στατιστικής σημαντικότητας και R² = συντελεστής προσδιορισμού.

Η ανάλυση των ημερήσιων μέσων τιμών ανέδειξε κυρίως θετικές σχέσεις μεταξύ θερμοκρασίας και PM_{10} , με σαφή όμως διαφοροποίηση ως προς την έντασή τους. Το συνεπέστερο χωρικά εύρημα καταγράφηκε κατά τη θερινή περίοδο. Στην Ελευσίνα, στη Λυκόβρυση και στους Θρακομακεδόνες οι συντελεστές συσχέτισης ήταν σχεδόν ισοδύναμοι, με $r = 0,488$, $r = 0,485$ και $r = 0,476$ αντίστοιχα. Οι αντίστοιχες τιμές του R² ανήλθαν σε 0,238, 0,235 και 0,226, γεγονός που υποδηλώνει ότι η θερμοκρασία απέδωσε

περίπου το ένα τέταρτο της ημερήσιας μεταβλητότητας των PM_{10} στους συγκεκριμένους σταθμούς. Στην Αριστοτέλους, αντίθετα, η θερινή σχέση ήταν αισθητά ασθενέστερη, με $r = 0,222$ και $R^2 = 0,049$.

Το θερινό αυτό πρότυπο δεν επαναλήφθηκε με την ίδια μορφή στις υπόλοιπες εποχές. Στην Ελευσίνα και στους Θρακομακεδόνες καταγράφηκαν σχετικά εντονότερες θετικές σχέσεις και κατά τον χειμώνα, με $R^2 = 0,166$ και $0,174$ αντίστοιχα. Στους Θρακομακεδόνες η θετική σχέση διατηρήθηκε σε αξιοσημείωτο βαθμό και το φθινόπωρο, με $r = 0,361$ και $R^2 = 0,131$. Αντίθετα, στην Αριστοτέλους η φθινοπωρινή σχέση ήταν ουσιαστικά ανύπαρκτη, ενώ στη Λυκόβρυση οι χειμερινές, ανοιξιάτικες και φθινοπωρινές συσχετίσεις παρέμειναν πολύ ασθενείς. Επομένως, η κατεύθυνση της σχέσης ήταν συχνά θετική, αλλά η ισχύς της εξαρτιόταν σημαντικά από τη θέση και την εποχή.

Η ανάλυση των ημερήσιων διαφορών παρουσίασε διαφορετικό στατιστικό αποτύπωμα. Οι θετικές σχέσεις διατηρήθηκαν στις περισσότερες περιπτώσεις, αλλά οι τιμές του r και του R^2 ήταν γενικά χαμηλότερες. Η εξασθένηση αυτή δείχνει ότι μέρος της σχέσης που εμφανίζεται στα ημερήσια επίπεδα συνδέεται πιθανότατα με βραδύτερες εποχικές ή ενδοεποχικές μεταβολές, οι οποίες περιορίζονται όταν χρησιμοποιούνται πρώτες διαφορές. Και στη βραχυχρόνια ανάλυση, το καλοκαίρι αποτέλεσε την πιο συνεπή εποχή. Η ισχυρότερη σχέση καταγράφηκε στη Λυκόβρυση, με $r=0,378$, $\beta=2,271$, $R^2=0,143$ και $p<0,001$. Ακολούθησαν οι Θρακομακεδόνες, με $r=0,334$ και $R^2=0,112$, η Ελευσίνα, με $r=0,281$ και $R^2=0,079$, και η Αριστοτέλους, με $r=0,267$ και $R^2=0,071$. Η θετική κατεύθυνση ήταν επομένως κοινή και στους τέσσερις σταθμούς, όμως η ερμηνευτική ικανότητα των μοντέλων παρέμεινε σαφώς χαμηλότερη από εκείνη που καταγράφηκε στα ημερήσια επίπεδα.

Κατά την άνοιξη παρατηρήθηκε επίσης ομοιόμορφα θετική εικόνα. Οι τιμές του r κυμάνθηκαν από $0,211$ στη Λυκόβρυση έως $0,266$ στην Αριστοτέλους, ενώ οι τιμές του R^2 δεν υπερέβησαν το $0,071$. Το αποτέλεσμα αυτό δείχνει ότι η θετική βραχυχρόνια συνδιακύμανση ήταν στατιστικά ανιχνεύσιμη, αλλά εξηγούσε μόνο μικρό ποσοστό της ημερήσιας μεταβλητότητας των PM_{10} .

Το φθινόπωρο η κατεύθυνση παρέμεινε θετική σε όλους τους σταθμούς, αλλά η ένταση της σχέσης διαφοροποιήθηκε περισσότερο. Οι Θρακομακεδόνες και η Αριστοτέλους εμφάνισαν τις υψηλότερες τιμές, με $R^2=0,084$ και $0,063$ αντίστοιχα, ενώ στην Ελευσίνα και ιδιαίτερα στη Λυκόβρυση η σχέση ήταν αισθητά ασθενέστερη. Η χειμερινή περίοδος

παρουσίασε τη μεγαλύτερη ετερογένεια. Στην Αριστοτέλους, στην Ελευσίνα και στους Θρακομακεδόνες οι συσχετίσεις ήταν πολύ ασθενείς, ενώ στη Λυκόβρυση καταγράφηκε αρνητική σχέση, με $r=-0,115$ και $R^2=0,013$.

Η γραφική ανάλυση των κατηγοριών της ΔT παρέχει πρόσθετη υποστήριξη στη διαφοροποίηση αυτή. Κατά το καλοκαίρι, οι διάμεσοι της ΔPM_{10} μετακινήθηκαν συχνότερα από αρνητικές τιμές στις κατηγορίες μείωσης της θερμοκρασίας προς μηδενικές ή θετικές τιμές στις κατηγορίες αύξησής της. Η διαβάθμιση ήταν περισσότερο εμφανής στη Λυκόβρυση και στους Θρακομακεδόνες, δηλαδή στους σταθμούς στους οποίους καταγράφηκαν και οι υψηλότερες θερινές τιμές του R^2 στην ανάλυση των ημερήσιων μεταβολών. Η συμφωνία μεταξύ των δύο γραφικών προσεγγίσεων ενισχύει την εσωτερική συνοχή του θερινού ευρήματος.

Η συμφωνία αυτή, ωστόσο, δεν συνεπάγεται πλήρη διαχωρισμό των κατανομών. Τα πλαίσια, οι απολήξεις και οι ακραίες παρατηρήσεις παρουσίασαν σημαντική επικάλυψη μεταξύ των κατηγοριών της ΔT . Συνεπώς, ακόμη και όταν οι διάμεσοι ακολουθούσαν συστηματική μετάβαση, ημέρες με παρόμοια θερμοκρασιακή μεταβολή μπορούσαν να συνοδεύονται από πολύ διαφορετικές μεταβολές των PM_{10} . Η θερμοκρασία επομένως συνδεόταν με την κεντρική τάση της ΔPM_{10} , χωρίς να προσδιορίζει από μόνη της ολόκληρη την κατανομή της.

Η σημαντικότερη διαφορά μεταξύ των δύο αναλυτικών προσεγγίσεων αφορά το μέγεθος της ερμηνευτικής ικανότητας. Η μέγιστη τιμή του R^2 στην ανάλυση των ημερήσιων μέσων τιμών ήταν 0,238, ενώ στις ημερήσιες μεταβολές μειώθηκε σε 0,143. Η σύγκριση αυτή δεν πρέπει να ερμηνεύεται ως άμεση υπεροχή της μίας μεθόδου έναντι της άλλης, καθώς οι δύο αναλύσεις αφορούν διαφορετικές εξαρτημένες μεταβλητές. Δείχνει, όμως, ότι η σχέση θερμοκρασίας- PM_{10} αποτυπώθηκε ισχυρότερα στα ημερήσια επίπεδα από ό,τι στις μεταβολές μεταξύ διαδοχικών ημερών.

Το εύρημα αυτό υποδηλώνει ότι οι παρατηρούμενες σχέσεις δεν περιορίζονται αποκλειστικά σε άμεσες ημερήσιες αποκρίσεις. Τα ημερήσια μέσα ενσωματώνουν ευρύτερα εποχικά μοτίβα, μεταβολές στη σταθερότητα της ατμόσφαιρας, στη μεταφορά σωματιδίων, στην ξηρότητα του εδάφους και στις πηγές εκπομπής, τα οποία δεν αποτυπώνονται πλήρως στις πρώτες διαφορές. Αντίθετα, η βραχυχρόνια ανάλυση απομονώνει περισσότερο την ημερήσια συνδιακύμανση, αλλά παραμένει ευαίσθητη σε επεισοδιακές μεταβολές και σε παράγοντες που δεν περιλαμβάνονται στο απλό διμεταβλητό μοντέλο.

Ιδιαίτερη προσοχή απαιτείται και στην ερμηνεία της στατιστικής σημαντικότητας. Η πλειονότητα των σχέσεων παρουσίασε $p < 0,05$, γεγονός που επηρεάζεται και από το μεγάλο μέγεθος των επιμέρους δειγμάτων. Οι τιμές του p πρέπει συνεπώς να συνεκτιμώνται με τις τιμές του r , του R^2 και των διαστημάτων εμπιστοσύνης. Σε αρκετές περιπτώσεις, η στατιστική σημαντικότητα συνυπήρξε με πολύ περιορισμένη ερμηνευτική ικανότητα.

Η εικόνα που προέκυψε ανέδειξε ένα σαφώς αναγνωρίσιμο θερινό πρότυπο στη σχέση θερμοκρασίας– PM_{10} . Το πρότυπο αυτό εμφανίστηκε τόσο στις ημερήσιες τιμές όσο και στις μεταβολές από ημέρα σε ημέρα, με μεγαλύτερη συνέπεια στην Ελευσίνα, στους Θρακομακεδόνες και στη Λυκόβρυση. Η έντασή του, ωστόσο, περιορίστηκε όταν η ανάλυση βασίστηκε στις πρώτες διαφορές, ενώ τον χειμώνα οι σχέσεις ήταν ασθενείς και χωρικά ασυνεπείς. Η θερμοκρασία φαίνεται, επομένως, να συνδέεται με μέρος της μεταβλητότητας των PM_{10} , χωρίς όμως η σχέση να παραμένει σταθερή μεταξύ εποχών, σταθμών και χρονικών κλιμάκων. Τα ευρήματα δεν επιτρέπουν μονοπαραγοντική ή αιτιώδη ερμηνεία, αλλά υποστηρίζουν την ύπαρξη εποχικά και χωρικά διαφοροποιημένης γραμμικής συνδιακύμανσης.

4.9 Σχέση θερμοκρασίας και διοξειδίου του θείου (SO_2)

Η σχέση μεταξύ της θερμοκρασίας και των ημερήσιων συγκεντρώσεων διοξειδίου του θείου (SO_2) διερευνήθηκε στους σταθμούς Αριστοτέλους, Ελευσίνας και Πατησίων κατά την περίοδο 2016–2024. Οι σταθμοί Θρακομακεδόνων και Λυκόβρυσης δεν εντάχθηκαν στην ανάλυση, λόγω απουσίας διαθέσιμων μετρήσεων SO_2 για την εξεταζόμενη περίοδο.

Η διερεύνηση οργανώθηκε σε δύο συμπληρωματικές χρονικές κλίμακες. Αρχικά αξιολογήθηκε η σχέση μεταξύ της ημερήσιας μέσης θερμοκρασίας και της αντίστοιχης ημερήσιας μέσης συγκέντρωσης SO_2 , με σκοπό την αποτύπωση των γενικότερων ενδοεποχικών προτύπων συνδιακύμανσης. Στη συνέχεια εξετάστηκε η σχέση μεταξύ των ημερήσιων μεταβολών των δύο μεγεθών, ώστε να αποτιμηθεί κατά πόσο οι μεταβολές της θερμοκρασίας από τη μία ημέρα στην επόμενη συνοδεύονταν από αντίστοιχες μεταβολές στη συγκέντρωση του ρύπου.

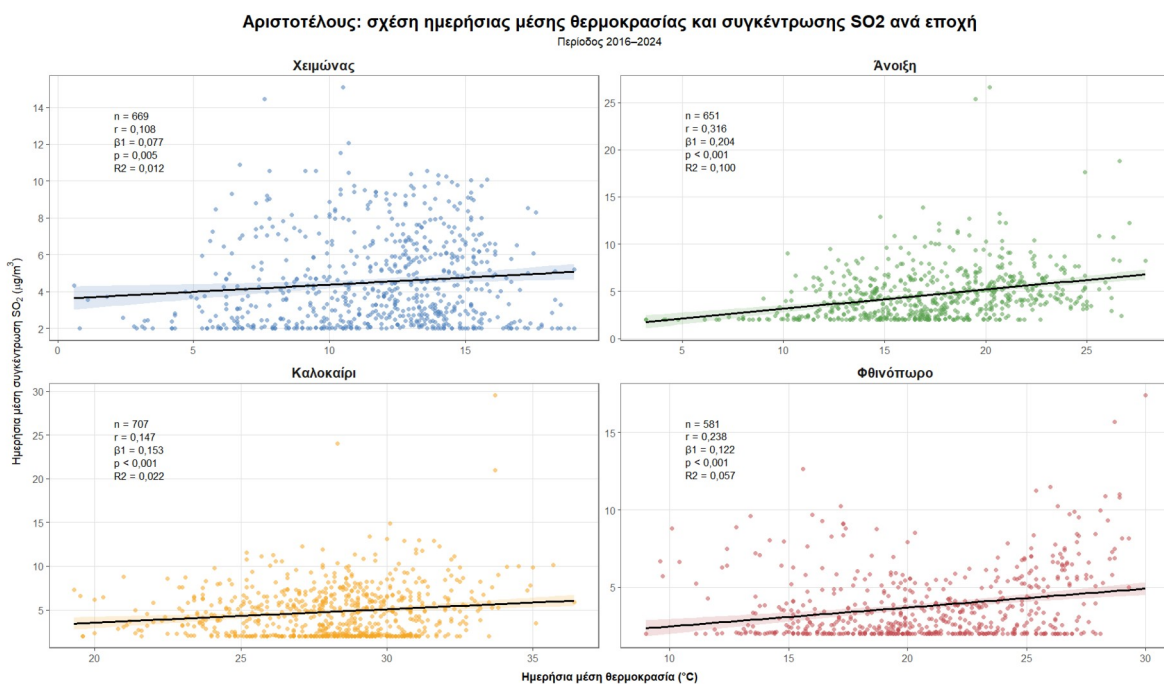
Η επεξεργασία πραγματοποιήθηκε χωριστά ανά σταθμό και εποχή και βασίστηκε αποκλειστικά σε ημέρες με ταυτόχρονα έγκυρες παρατηρήσεις θερμοκρασίας και SO₂. Για την ανάλυση των ημερήσιων διαφορών χρησιμοποιήθηκαν μόνο ζεύγη παρατηρήσεων που αντιστοιχούσαν σε πραγματικά διαδοχικές ημερομηνίες, ώστε να αποκλειστούν φαινομενικές μεταβολές που θα μπορούσαν να οφείλονται σε χρονικά κενά των χρονοσειρών.

4.9.1 Σχέση ημερήσιας μέσης θερμοκρασίας και ημερήσιας συγκέντρωσης SO₂ ανά εποχή και σταθμό

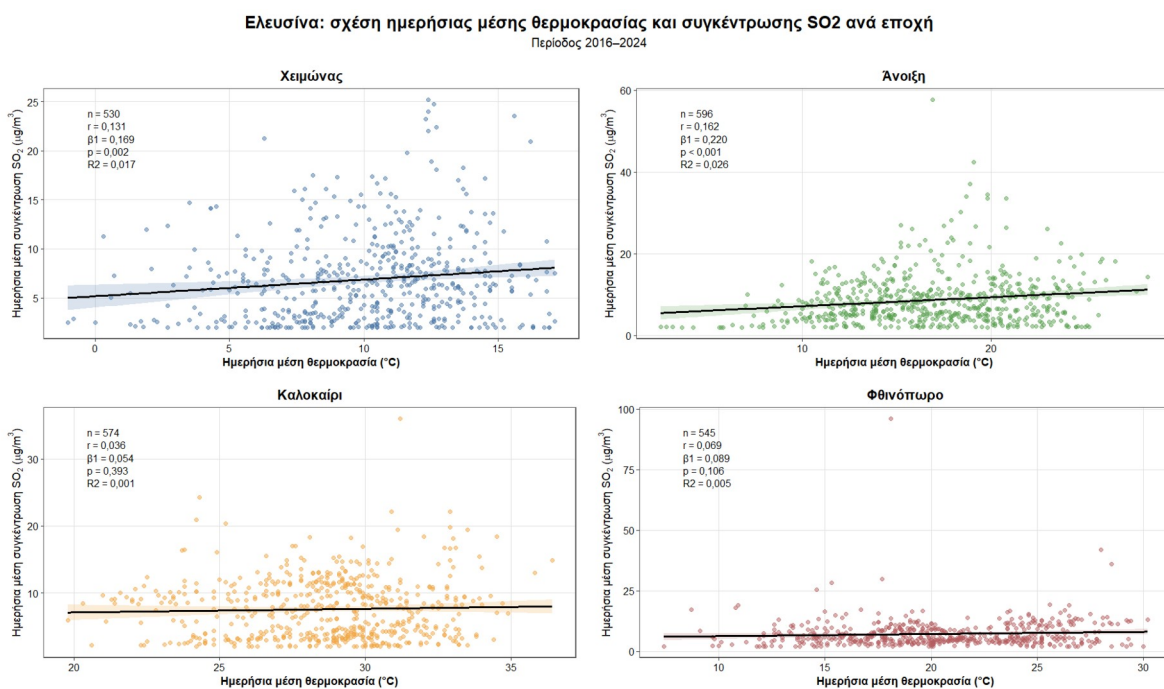
Η εποχική διερεύνηση της σχέσης μεταξύ ημερήσιας μέσης θερμοκρασίας και συγκέντρωσης SO₂ πραγματοποιήθηκε χωριστά για κάθε σταθμό, προκειμένου να εξεταστεί αν η συμπεριφορά του ρύπου μεταβάλλεται μέσα στο έτος και μεταξύ περιοχών με διαφορετικά χαρακτηριστικά. Για τους σταθμούς Αριστοτέλους και Πατησίων χρησιμοποιήθηκαν οι θερμοκρασιακές παρατηρήσεις του μετεωρολογικού σταθμού Ελληνικού, ενώ για την Ελευσίνα αξιοποιήθηκαν οι μετρήσεις του ομώνυμου μετεωρολογικού σταθμού. Στην ανάλυση συμπεριλήφθηκαν μόνο οι ημερομηνίες για τις οποίες υπήρχαν ταυτόχρονα έγκυρες τιμές θερμοκρασίας και συγκέντρωσης SO₂.

Για κάθε συνδυασμό εποχής και σταθμού εφαρμόστηκε απλό γραμμικό μοντέλο παλινδρόμησης. Υπολογίστηκαν ο αριθμός των διαθέσιμων παρατηρήσεων, ο συντελεστής συσχέτισης Pearson r , η μη τυποποιημένη κλίση β , η τιμή p και ο συντελεστής προσδιορισμού R^2 . Η κλίση β εκφράζει την εκτιμώμενη μεταβολή της ημερήσιας συγκέντρωσης SO₂, σε $\mu\text{g}/\text{m}^3$, που αντιστοιχεί σε αύξηση της ημερήσιας μέσης θερμοκρασίας κατά 1 °C.

Τα αποτελέσματα παρουσιάζονται στα Σχήματα 4.67–4.69.

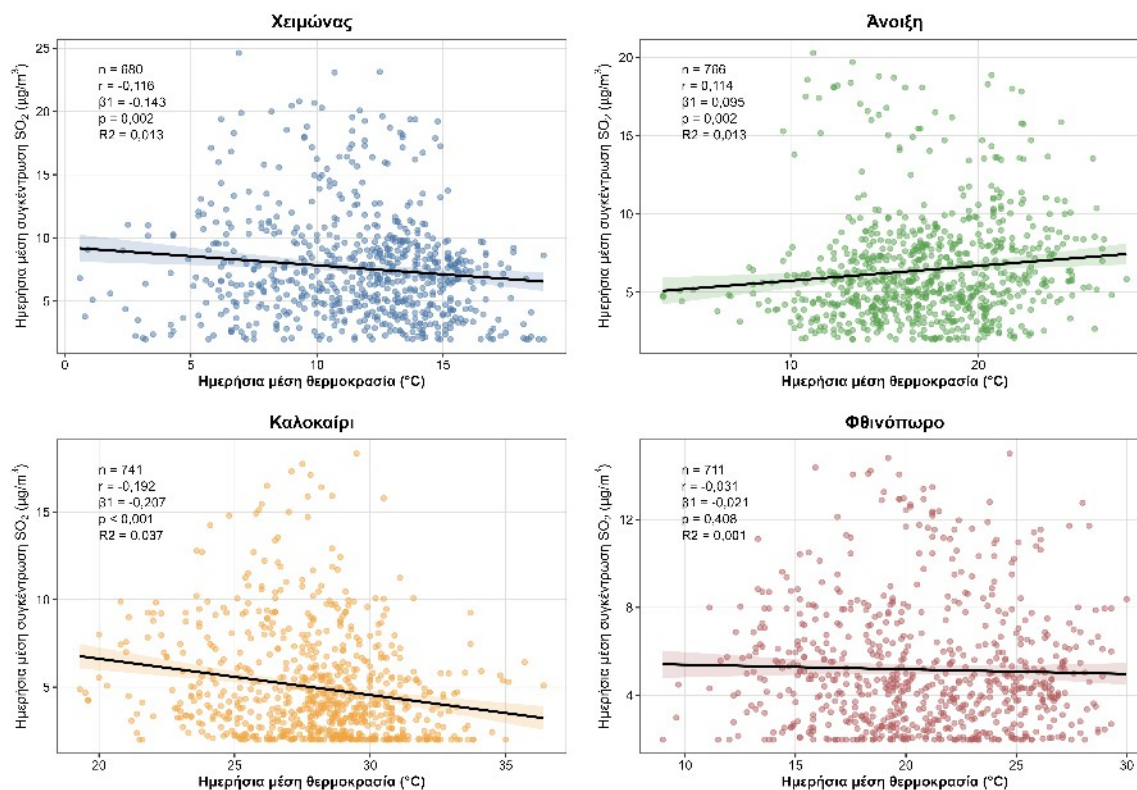


Σχήμα 4.67. Σχέση μεταξύ της ημερήσιας μέσης θερμοκρασίας και της ημερήσιας μέσης συγκέντρωσης SO₂ ανά εποχή στον **σταθμό Αριστοτέλους** κατά την περίοδο 2016–2024.



Σχήμα 4.68. Σχέση μεταξύ της ημερήσιας μέσης θερμοκρασίας και της ημερήσιας μέσης συγκέντρωσης SO₂ ανά εποχή στον **σταθμό Ελευσίνας** κατά την περίοδο 2016–2024.

Πατήσια: σχέση ημερήσιας μέσης θερμοκρασίας και συγκέντρωσης SO₂ ανά εποχή
Περίοδος 2016–2024



Σχήμα 4.69. Σχέση μεταξύ της ημερήσιας μέσης θερμοκρασίας και της ημερήσιας μέσης συγκέντρωσης SO₂ ανά εποχή στον **σταθμό Πατησίων** κατά την περίοδο 2016–2024.

Η συνολική εικόνα των Σχημάτων 4.67–4.69 δεν υποστηρίζει την ύπαρξη ενός ενιαίου μηχανισμού γραμμικής συνδιακύμανσης μεταξύ θερμοκρασίας και SO₂. Αντίθετα, τα αποτελέσματα διαφοροποιούνται αισθητά ανά θέση μέτρησης, αποκαλύπτοντας τρεις διακριτές χωρικές συμπεριφορές. Η Αριστοτέλους χαρακτηρίζεται από σταθερά θετικό πρόσημο της σχέσης, η Ελευσίνα από ασθενή και εποχικά περιορισμένη θετική σύνδεση, ενώ η Πατησίων εμφανίζει μεταβολή της κατεύθυνσης ανά εποχή.

Στην Αριστοτέλους, η εκτιμώμενη κλίση παρέμεινε θετική σε όλες τις εποχές, γεγονός που υποδηλώνει συνέπεια ως προς την κατεύθυνση της σχέσης. Η σαφέστερη συσχέτιση καταγράφηκε την άνοιξη, με $r=0,316$, $\beta=0,204$, $R^2=0,100$ και $p<0,001$. Στο πλαίσιο του αντίστοιχου μοντέλου, αύξηση της θερμοκρασίας κατά 1°C αντιστοιχούσε σε εκτιμώμενη

αύξηση της συγκέντρωσης SO_2 κατά $0,204 \mu\text{g}/\text{m}^3$. Το φθινόπωρο η σχέση παρέμεινε θετική αλλά εξασθένησε, με $r=0,238$, $\beta=0,122$ και $R^2=0,057$. Κατά τον χειμώνα και το καλοκαίρι οι θετικές συσχετίσεις ήταν ασθενέστερες, με $R^2=0,012$ και $R^2=0,022$, αντίστοιχα. Επομένως, στον συγκεκριμένο σταθμό διατηρήθηκε το θετικό πρόσημο, αλλά όχι σταθερή ερμηνευτική ισχύς.

Στην Ελευσίνα, η θερμοκρασία παρουσίασε επίσης θετική κατεύθυνση σε όλες τις εποχές, χωρίς όμως η σχέση να αποκτά ουσιαστικό μέγεθος. Η σχετικά σαφέστερη σύνδεση εμφανίστηκε την άνοιξη, με $r=0,162$, $\beta=0,220$, $R^2=0,026$ και $p<0,001$, ενώ ακολούθησε ο χειμώνας, με $r=0,131$, $\beta=0,169$, $R^2=0,017$ και $p=0,002$. Κατά το καλοκαίρι και το φθινόπωρο οι γραμμές παλινδρόμησης ήταν σχεδόν οριζόντιες και οι σχέσεις δεν ήταν στατιστικά σημαντικές. Συγκεκριμένα, το καλοκαίρι καταγράφηκαν $r=0,036$, $R^2=0,001$ και $p=0,393$, ενώ το φθινόπωρο $r=0,069$, $R^2=0,005$ και $p=0,106$. Η εικόνα αυτή δείχνει ότι στην Ελευσίνα η θερμοκρασία δεν συνδεόταν με σταθερό και αναπαραγωγίμο τρόπο με τις ημερήσιες συγκεντρώσεις SO_2 .

Η Πατησίων παρουσίασε διαφορετική δομή αποτελεσμάτων, καθώς το πρόσημο της σχέσης άλλαξε μεταξύ των εποχών. Τον χειμώνα παρατηρήθηκε ασθενής αρνητική συσχέτιση, με $r=-0,116$, $\beta=-0,143$, $R^2=0,013$ και $p=0,002$. Την άνοιξη η κατεύθυνση αντιστράφηκε και έγινε ασθενώς θετική, με $r=0,114$, $\beta=0,095$, $R^2=0,013$ και $p=0,002$. Η ισχυρότερη αρνητική σχέση του σταθμού καταγράφηκε το καλοκαίρι, με $r=-0,192$, $\beta=-0,207$, $R^2=0,037$ και $p<0,001$. Το φθινόπωρο δεν προέκυψε ουσιαστική γραμμική σύνδεση, καθώς $r=-0,031$, $R^2=0,001$ και $p=0,408$. Η εναλλαγή του προσήμου υποδηλώνει ότι η επίδραση της θερμοκρασίας, ως απομονωμένης μεταβλητής, δεν εκδηλωνόταν με σταθερό τρόπο στον συγκεκριμένο αστικό σταθμό.

Από εποχική άποψη, η άνοιξη ήταν η μόνη περίοδος κατά την οποία καταγράφηκε θετική και στατιστικά σημαντική συσχέτιση και στους τρεις σταθμούς. Η ένταση, ωστόσο, ήταν σαφώς μεγαλύτερη στην Αριστοτέλους και πολύ χαμηλότερη στην Ελευσίνα και στην Πατησίων. Αντίθετα, το καλοκαίρι παρουσίασε τη μεγαλύτερη χωρική απόκλιση: θετική σχέση στην Αριστοτέλους, απουσία στατιστικά σημαντικής σύνδεσης στην Ελευσίνα και αρνητική σχέση στην Πατησίων. Το εύρημα αυτό καθιστά σαφές ότι το εποχικό περιβάλλον δεν επηρεάζει με τον ίδιο τρόπο τη σχέση θερμοκρασίας- SO_2 σε όλες τις θέσεις.

Πέρα από την κατεύθυνση των γραμμικών τάσεων, ιδιαίτερη σημασία έχει η μορφή των κατανομών. Στα διαγράμματα παρατηρείται έντονη συγκέντρωση τιμών στα χαμηλότερα

επίπεδα SO_2 , ταυτόχρονα με περιορισμένο αριθμό ημερών με αισθητά υψηλότερες συγκεντρώσεις. Η ασυμμετρία αυτή, μαζί με την ευρεία διασπορά γύρω από τις γραμμές παλινδρόμησης, εξηγεί σε σημαντικό βαθμό τη χαμηλή ερμηνευτική ικανότητα των μοντέλων. Ακόμη και στην ισχυρότερη περίπτωση, στην Αριστοτέλους την άνοιξη, η θερμοκρασία απέδωσε μόνο το 10,0% της ημερήσιας μεταβλητότητας του SO_2 .

Η στατιστική σημαντικότητα αρκετών σχέσεων δεν πρέπει, συνεπώς, να συγχέεται με υψηλή πρακτική ή ερμηνευτική σημασία. Οι σχετικά μεγάλοι αριθμοί παρατηρήσεων αυξάνουν τη δυνατότητα ανίχνευσης ακόμη και ασθενών συσχετίσεων, ενώ οι χαμηλές τιμές του R^2 δείχνουν ότι το μεγαλύτερο μέρος της μεταβλητότητας παρέμεινε ανεξήγητο. Η θερμοκρασία φαίνεται να αποτυπώνει μόνο μία περιορισμένη διάσταση της ημερήσιας συμπεριφοράς του SO_2 .

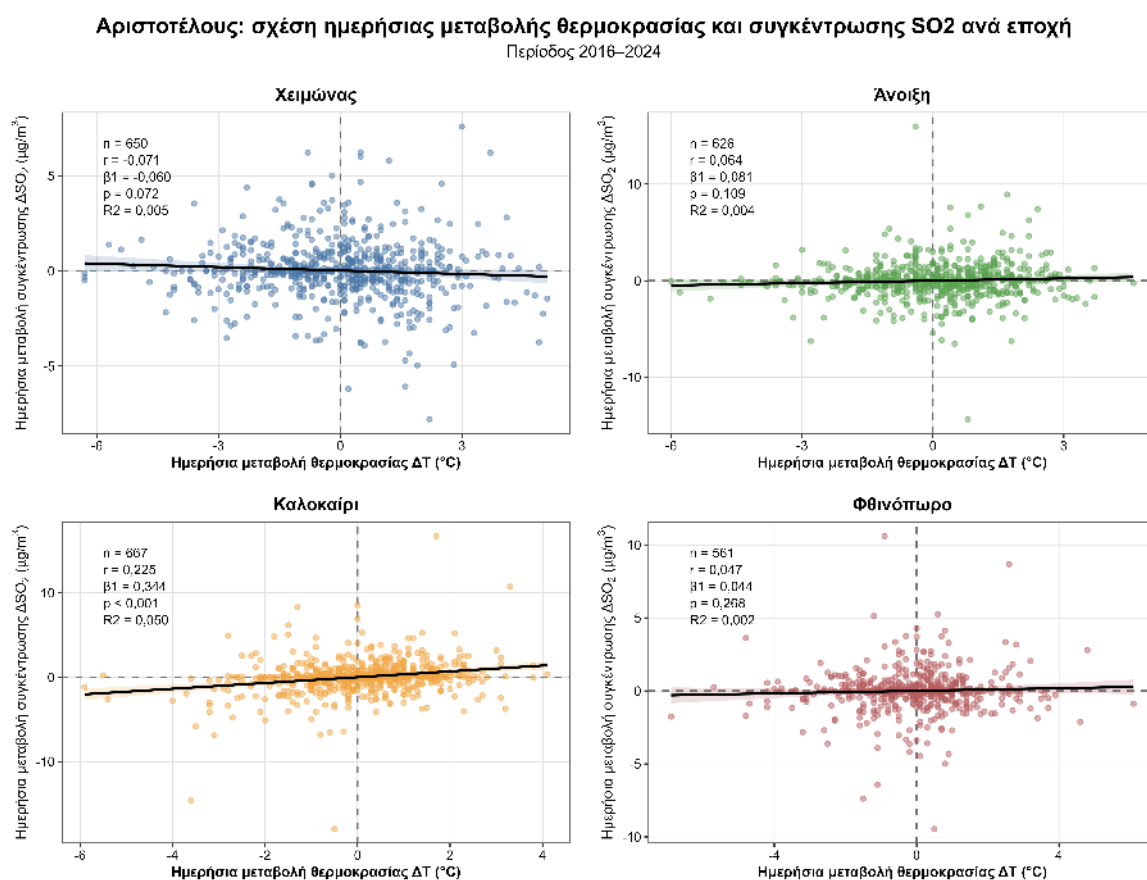
Η εικόνα που προέκυψε ανέδειξε περισσότερο χωρική ασυμμετρία παρά κοινό εποχικό πρότυπο. Η Αριστοτέλους παρουσίασε σταθερά θετική κατεύθυνση, η Ελευσίνα ασθενή και μη συνεχή σύνδεση, ενώ η Πατησίων εμφάνισε εναλλαγές μεταξύ θετικών, αρνητικών και σχεδόν μηδενικών σχέσεων. Η διαφοροποίηση αυτή υποδηλώνει ότι η συμπεριφορά του SO_2 συνδέεται σε σημαντικό βαθμό με τοπικούς και επεισοδιακούς παράγοντες, όπως η ένταση και η χρονική κατανομή των εκπομπών, η μεταφορά αέριων μαζών, η ταχύτητα και η διεύθυνση του ανέμου, η βροχόπτωση και οι συνθήκες ατμοσφαιρικής ανάμιξης. Καθώς οι παράγοντες αυτοί δεν περιλαμβάνονται στα συγκεκριμένα διμεταβλητά μοντέλα, τα αποτελέσματα αποτυπώνουν στατιστική συνδιακύμανση και δεν τεκμηριώνουν αιτιώδη επίδραση της θερμοκρασίας στις συγκεντρώσεις SO_2 .

4.9.2 Σχέση ημερήσιας μεταβολής της θερμοκρασίας και ημερήσιας μεταβολής της συγκέντρωσης SO_2 ανά εποχή και σταθμό

Η βραχυχρόνια δυναμική της σχέσης θερμοκρασίας– SO_2 διερευνήθηκε μέσω των διαφορών που καταγράφηκαν μεταξύ διαδοχικών ημερών. Με τον τρόπο αυτό, η ανάλυση αποδεδεσμεύεται σε σημαντικό βαθμό από τα απόλυτα επίπεδα των δύο μεταβλητών και εστιάζει στο κατά πόσο μια ημερήσια αύξηση ή μείωση της θερμοκρασίας συνοδεύεται από αντίστοιχη μεταβολή της συγκέντρωσης SO_2 . Για την αποφυγή τεχνητών διαφορών λόγω κενών στις χρονοσειρές, χρησιμοποιήθηκαν αποκλειστικά ζεύγη ημερολογιακά διαδοχικών ημερών με ταυτόχρονα έγκυρες παρατηρήσεις.

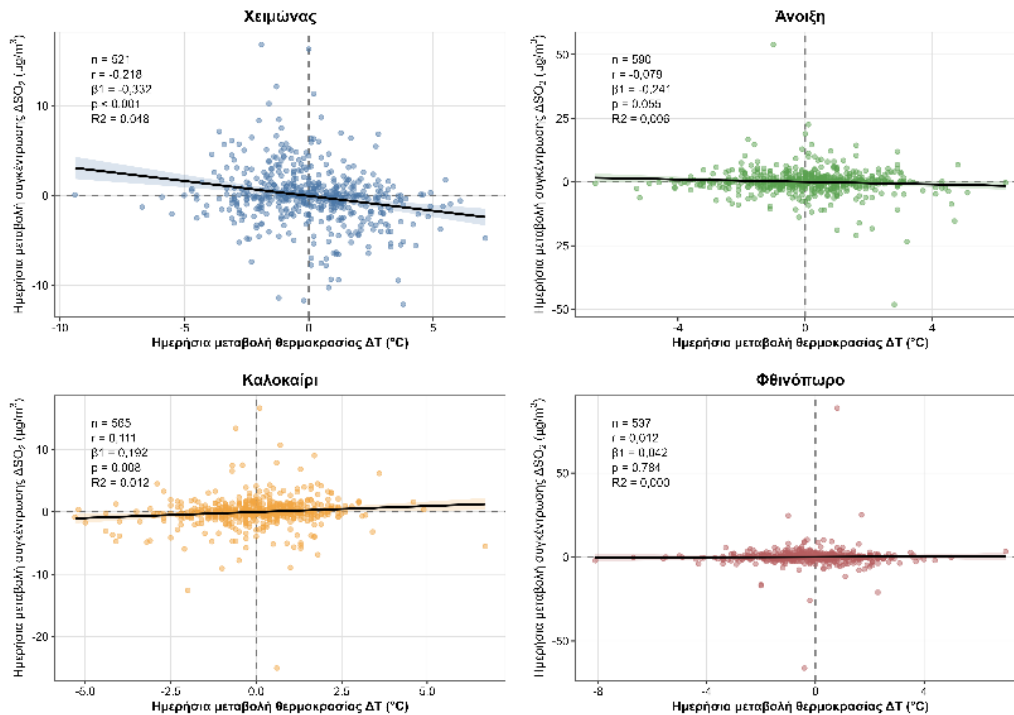
Η σχέση μεταξύ της ημερήσιας μεταβολής της μέσης θερμοκρασίας, ΔT , και της ημερήσιας μεταβολής της συγκέντρωσης SO_2 , ΔSO_2 , εξετάστηκε χωριστά ανά εποχή και σταθμό με απλή γραμμική παλινδρόμηση. Για κάθε μοντέλο υπολογίστηκαν ο αριθμός των έγκυρων ζευγών παρατηρήσεων, ο συντελεστής συσχέτισης Pearson r , η μη τυποποιημένη κλίση β , η τιμή p και ο συντελεστής προσδιορισμού R^2 . Η κλίση β εκφράζει την εκτιμώμενη μεταβολή της ΔSO_2 , σε $\mu\text{g}/\text{m}^3$, για αύξηση της ΔT κατά 1°C .

Τα αποτελέσματα παρουσιάζονται στα Σχήματα 4.70–4.72.



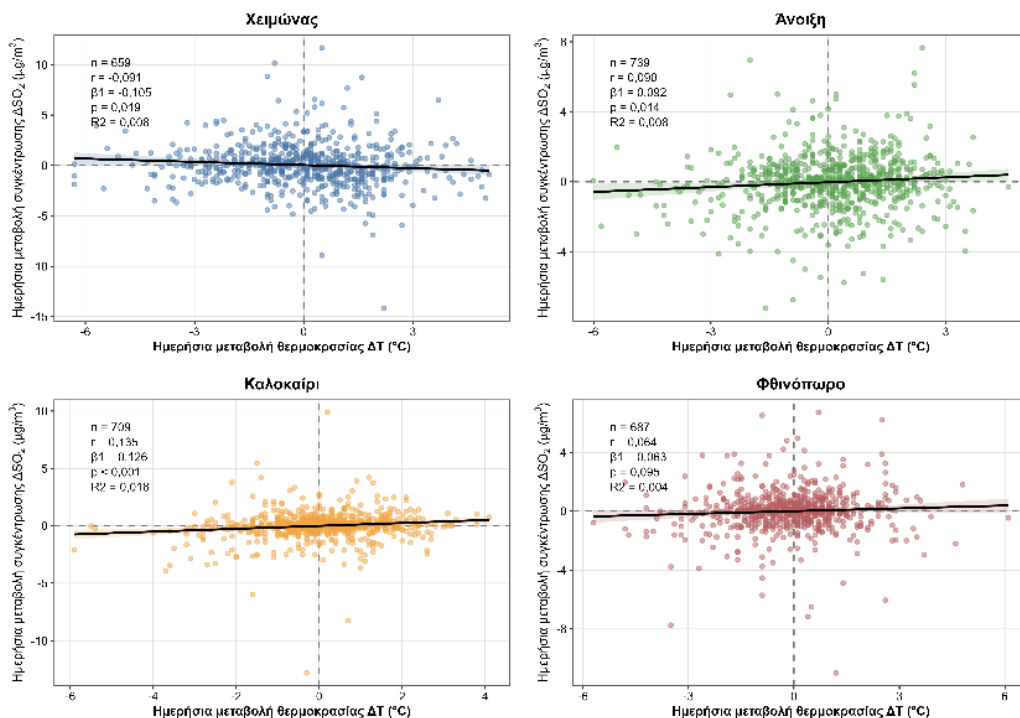
Σχήμα 4.70. Σχέση μεταξύ της ημερήσιας μεταβολής της μέσης θερμοκρασίας και της ημερήσιας μεταβολής της συγκέντρωσης SO_2 ανά εποχή στον **σταθμό Αριστοτέλους** κατά την περίοδο 2016–2024.

Ελευσίνα: σχέση ημερήσιας μεταβολής θερμοκρασίας και συγκέντρωσης SO₂ ανά εποχή
Περίοδος 2016–2024



Σχήμα 4.71. Σχέση μεταξύ της ημερήσιας μεταβολής της μέσης θερμοκρασίας και της ημερήσιας μεταβολής της συγκέντρωσης SO₂ ανά εποχή στον **σταθμό Ελευσίνας** κατά την περίοδο 2016–2024.

Πατήσια: σχέση ημερήσιας μεταβολής θερμοκρασίας και συγκέντρωσης SO₂ ανά εποχή
Περίοδος 2016–2024



Σχήμα 4.72. Σχέση μεταξύ της ημερήσιας μεταβολής της μέσης θερμοκρασίας και της ημερήσιας μεταβολής της συγκέντρωσης SO₂ ανά εποχή στον **σταθμό Πατησίων** κατά την περίοδο 2016–2024.

Η ανάλυση των ημερήσιων διαφορών ανέδειξε ένα σαφώς ασθενέστερο και περισσότερο ασταθές πρότυπο από εκείνο που παρατηρήθηκε στις ημερήσιες μέσες τιμές. Οι περισσότερες γραμμές παλινδρόμησης παρέμειναν κοντά στην οριζόντια διεύθυνση, ενώ οι τιμές του R^2 ήταν σε όλες τις περιπτώσεις χαμηλές. Το αποτέλεσμα αυτό δείχνει ότι οι μεταβολές της θερμοκρασίας από τη μία ημέρα στην επόμενη εξηγούν πολύ μικρό μέρος της αντίστοιχης μεταβλητότητας του SO_2 .

Στην Αριστοτέλους, η κατεύθυνση της σχέσης μεταβλήθηκε εποχικά. Τον χειμώνα καταγράφηκε πολύ ασθενής αρνητική συσχέτιση, με $r=-0,071$, $\beta=-0,060$, $R^2=0,005$ και $p=0,072$, χωρίς στατιστική σημαντικότητα. Την άνοιξη η κλίση έγινε οριακά θετική, αλλά η σχέση παρέμεινε επίσης μη στατιστικά σημαντική ($r=0,064$, $R^2=0,004$, $p=0,109$). Αντίθετα, το καλοκαίρι εμφανίστηκε η σαφέστερη σχέση του σταθμού, με $r=0,225$, $\beta=0,344$, $R^2=0,050$ και $p<0,001$. Το φθινόπωρο η σύνδεση εξασθένησε εκ νέου και δεν ήταν στατιστικά σημαντική. Επομένως, η θετική βραχυχρόνια συνδιακύμανση στην Αριστοτέλους περιορίστηκε ουσιαστικά στη θερινή περίοδο.

Στην Ελευσίνα παρατηρήθηκε διαφορετική εποχική διάταξη. Η χειμερινή περίοδος παρουσίασε την εντονότερη αρνητική σχέση ολόκληρης της ενότητας, με $r=-0,218$, $\beta=-0,332$, $R^2=0,048$ και $p<0,001$. Η συγκεκριμένη κλίση υποδηλώνει ότι ημερήσιες αυξήσεις της θερμοκρασίας συνδέονταν, κατά μέσο όρο, με μειώσεις της συγκέντρωσης SO_2 . Την άνοιξη η αρνητική κατεύθυνση διατηρήθηκε, αλλά η σχέση ήταν πολύ ασθενής και οριακά μη στατιστικά σημαντική ($p=0,055$). Κατά το καλοκαίρι το πρόσημο αντιστράφηκε και καταγράφηκε ασθενής θετική σχέση, με $r=0,111$, $\beta=0,192$, $R^2=0,012$ και $p=0,008$. Το φθινόπωρο η σχέση ήταν ουσιαστικά μηδενική. Η Ελευσίνα, συνεπώς, χαρακτηρίστηκε από έντονη εποχική εναλλαγή και όχι από σταθερή κατεύθυνση.

Στον σταθμό Πατησίων οι συσχετίσεις παρέμειναν πολύ ασθενείς σε όλες τις εποχές. Τον χειμώνα παρατηρήθηκε μικρή αρνητική σχέση ($r=-0,091$, $R^2=0,008$, $p=0,019$), ενώ την άνοιξη και το καλοκαίρι καταγράφηκαν ασθενείς θετικές σχέσεις, με $r=0,090$ και $r=0,135$, αντίστοιχα. Η θερινή σχέση ήταν η εντονότερη του σταθμού, αλλά εξηγούσε μόλις το 1,8% της μεταβλητότητας της ΔSO_2 . Το φθινόπωρο η συσχέτιση παρέμεινε πολύ περιορισμένη και δεν ήταν στατιστικά σημαντική. Παρά τις επιμέρους αλλαγές του προσήμου, δεν προέκυψε πρακτικά ισχυρή βραχυχρόνια σύνδεση.

Η εποχική αντιπαραβολή ανέδειξε δύο μόνο μερικώς επαναλαμβανόμενες τάσεις. Κατά τον χειμώνα οι συσχετίσεις ήταν αρνητικές και στους τρεις σταθμούς, με σαφέστερη έκφραση στην Ελευσίνα. Αντίθετα, κατά το καλοκαίρι το πρόσημο ήταν θετικό σε όλες τις θέσεις, με

εντονότερη σχέση στην Αριστοτέλους. Ωστόσο, ούτε το χειμερινό ούτε το θερινό πρότυπο εμφάνισαν υψηλή ερμηνευτική ισχύ, καθώς η μέγιστη τιμή του R^2 δεν υπερέβη το 0,050.

Ιδιαίτερα χαρακτηριστική είναι η συγκέντρωση της πλειονότητας των παρατηρήσεων γύρω από τη μηδενική ημερήσια μεταβολή του SO_2 . Παράλληλα, εμφανίζονται μεμονωμένα επεισόδια με μεγάλες θετικές ή αρνητικές μεταβολές, τα οποία δεν ακολουθούν σταθερή διάταξη ως προς τη ΔT . Η δομή αυτή υποδηλώνει ότι η ημερήσια συμπεριφορά του SO_2 διαμορφώνεται σε σημαντικό βαθμό από παράγοντες που δεν μεταβάλλονται συγχρονισμένα με τη θερμοκρασία.

Η στατιστική σημαντικότητα ορισμένων ασθενών σχέσεων πρέπει να ερμηνεύεται με προσοχή. Οι μεγάλοι αριθμοί παρατηρήσεων καθιστούν δυνατή την ανίχνευση μικρών αποκλίσεων από τη μηδενική συσχέτιση, χωρίς αυτό να συνεπάγεται υψηλή πρακτική σημασία. Οι χαμηλές τιμές των r και R^2 δείχνουν ότι ακόμη και στις στατιστικά σημαντικές περιπτώσεις η θερμοκρασιακή μεταβολή είχε περιορισμένη προβλεπτική ικανότητα.

Η εικόνα που προέκυψε δεν ανέδειξε σταθερό πρότυπο βραχυχρόνιας γραμμικής συνδιακύμανσης μεταξύ ΔT και ΔSO_2 . Η κατεύθυνση της σχέσης μεταβαλλόταν ανά εποχή και σταθμό, ενώ η ερμηνευτική ικανότητα των μοντέλων παρέμεινε χαμηλή. Το ασθενές θετικό θερινό και το αρνητικό χειμερινό πρότυπο αποτελούν περιγραφικές τάσεις και όχι γενικευμένες σχέσεις. Οι ημερήσιες μεταβολές του SO_2 είναι πιθανό να επηρεάζονται σημαντικά από πρόσκαιρες μεταβολές των εκπομπών, τις συνθήκες μεταφοράς και διασποράς, τη βροχόπτωση και άλλα μετεωρολογικά ή τοπικά χαρακτηριστικά που δεν περιλαμβάνονται στα συγκεκριμένα διμεταβλητά μοντέλα.

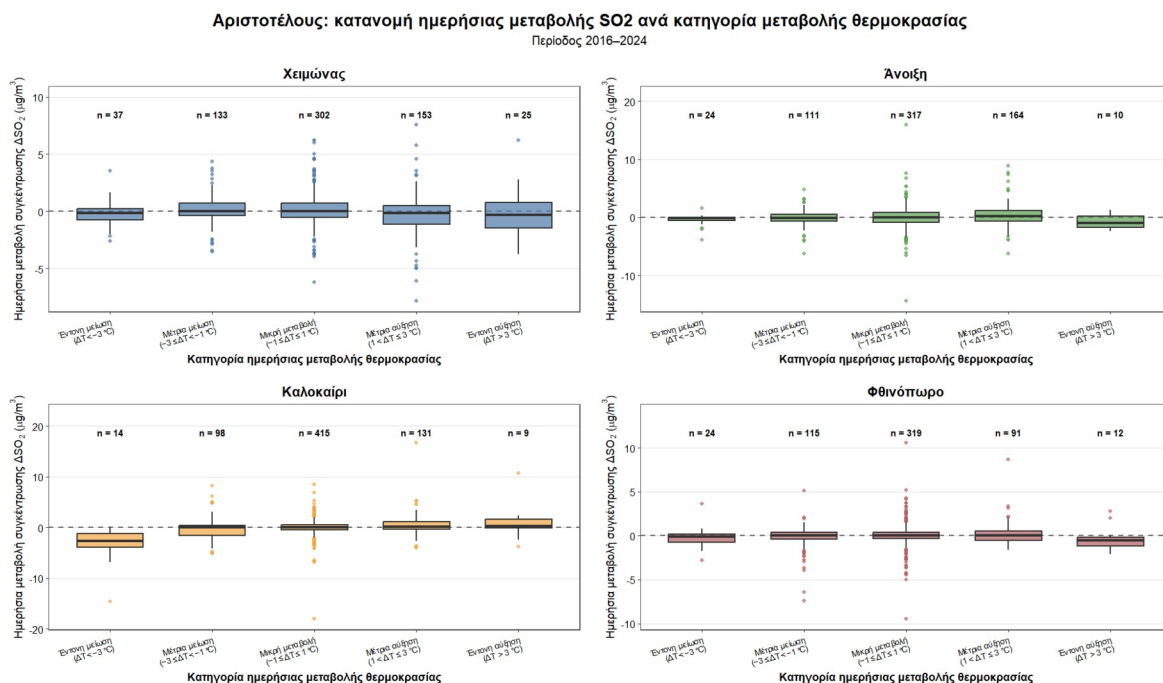
4.9.3 Κατανομή της ημερήσιας μεταβολής της συγκέντρωσης SO_2 ανά κατηγορία ημερήσιας μεταβολής της θερμοκρασίας

Μετά την εξέταση της ΔT ως συνεχούς μεταβλητής, διερευνήθηκε κατά πόσο η κατανομή της ημερήσιας μεταβολής της συγκέντρωσης SO_2 διαφοροποιείται μεταξύ διακριτών κατηγοριών θερμοκρασιακής μεταβολής. Η προσέγγιση αυτή επιτρέπει την αξιολόγηση όχι μόνο της κατεύθυνσης της σχέσης, αλλά και πιθανών μετατοπίσεων της διαμέσου, της διασποράς και της ασυμμετρίας της ΔSO_2 σε ημέρες με διαφορετική ένταση μεταβολής της θερμοκρασίας.

Οι τιμές της ΔT ταξινομήθηκαν στις ακόλουθες πέντε κατηγορίες:

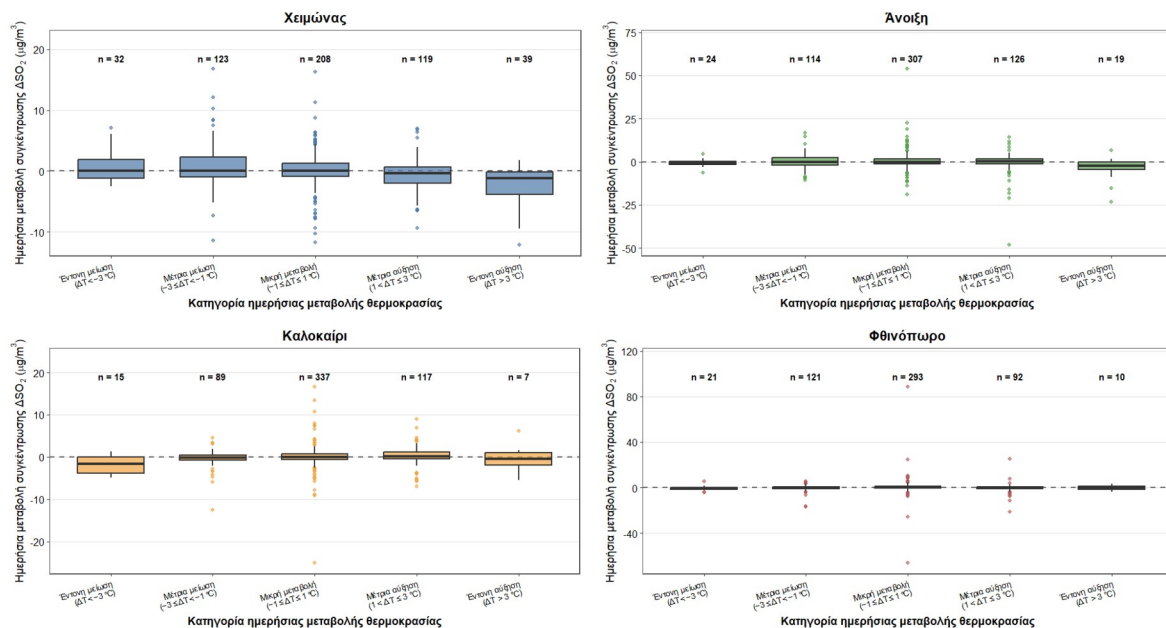
- ισχυρή μείωση: $\Delta T < -3 \text{ }^{\circ}\text{C}$,
- μέτρια μείωση: $-3 \text{ }^{\circ}\text{C} \leq \Delta T < -1 \text{ }^{\circ}\text{C}$,
- μικρή μεταβολή: $-1 \text{ }^{\circ}\text{C} \leq \Delta T < 1 \text{ }^{\circ}\text{C}$,
- μέτρια αύξηση: $1 \text{ }^{\circ}\text{C} \leq \Delta T < 3 \text{ }^{\circ}\text{C}$,
- ισχυρή αύξηση: $\Delta T \geq 3 \text{ }^{\circ}\text{C}$.

Η κατανομή της ΔSO_2 ανά κατηγορία αποτυπώθηκε με διαγράμματα πλαισίου και απολήξεων, τα οποία επιτρέπουν τη σύγκριση της διαμέσου, του ενδοτεταρτημοριακού εύρους, της συνολικής διασποράς και των τιμών εκτός των απολήξεων. Η ανάλυση πραγματοποιήθηκε χωριστά ανά εποχή και σταθμό και βασίστηκε αποκλειστικά σε ζεύγη πραγματικά διαδοχικών ημερών με ταυτόχρονα έγκυρες παρατηρήσεις. Τα αποτελέσματα παρουσιάζονται στα Σχήματα 4.73–4.75.



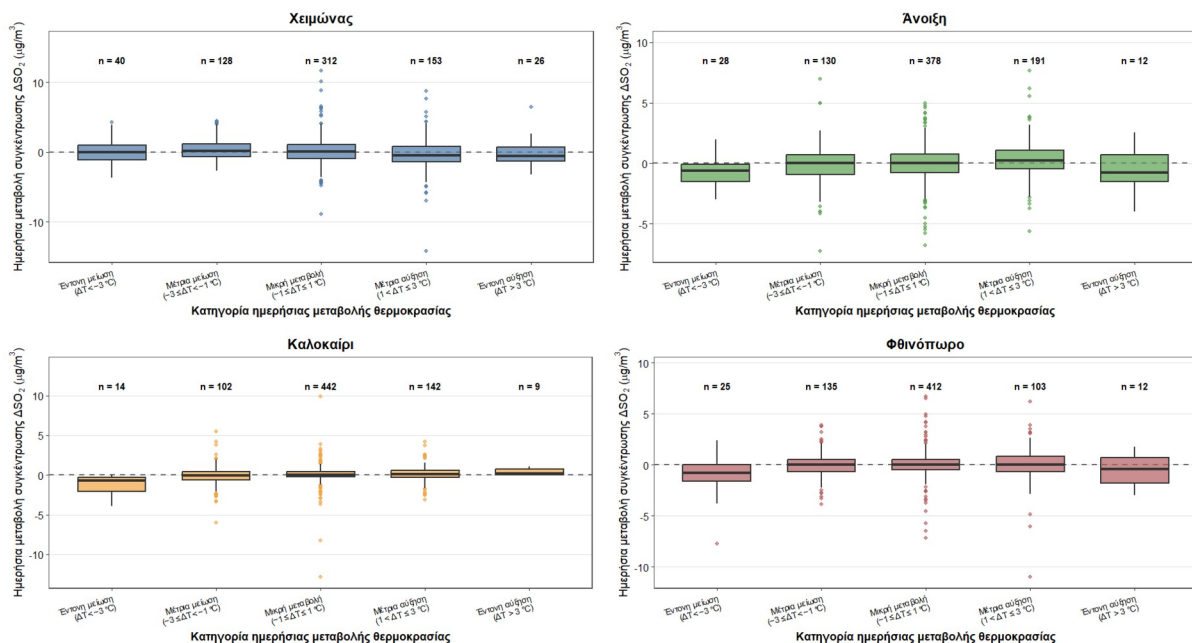
Σχήμα 4.73. Κατανομή της ημερήσιας μεταβολής της συγκέντρωσης SO_2 ανά κατηγορία ημερήσιας μεταβολής της μέσης θερμοκρασίας και εποχή στον **σταθμό Αριστοτέλους** κατά την περίοδο 2016–2024.

ΕΛΕΥΣΙΝΑ: κατανομή ημερήσιας μεταβολής SO_2 ανά κατηγορία μεταβολής θερμοκρασίας
Περίοδος 2016–2024



Σχήμα 4.74. Κατανομή της ημερήσιας μεταβολής της συγκέντρωσης SO_2 ανά κατηγορία ημερήσιας μεταβολής της μέσης θερμοκρασίας και εποχή στον σταθμό Ελευσίνας κατά την περίοδο 2016–2024.

ΠΑΤΗΣΙΑ: κατανομή ημερήσιας μεταβολής SO_2 ανά κατηγορία μεταβολής θερμοκρασίας
Περίοδος 2016–2024



Σχήμα 4.75. Κατανομή της ημερήσιας μεταβολής της συγκέντρωσης SO_2 ανά κατηγορία ημερήσιας μεταβολής της μέσης θερμοκρασίας και εποχή στον σταθμό Πατησίων κατά την περίοδο 2016–2024.

Σημείωση: Η κεντρική γραμμή κάθε πλαισίου αντιστοιχεί στη διάμεσο και το πλαίσιο στο ενδοτεταρτημοριακό εύρος. Οι απολήξεις αποτυπώνουν το εύρος των τιμών εντός των αντίστοιχων ορίων, ενώ τα μεμονωμένα σημεία αντιπροσωπεύουν τιμές εκτός των απολήξεων. Η διακεκομμένη οριζόντια γραμμή δηλώνει μηδενική ημερήσια μεταβολή της συγκέντρωσης SO_2 . Οι τιμές n επάνω από κάθε πλαίσιο αντιστοιχούν στον αριθμό των παρατηρήσεων της αντίστοιχης κατηγορίας.

Η συνολική εικόνα των Σχημάτων 4.73–4.75 χαρακτηρίζεται από έντονη επικάλυψη των κατανομών και από διαμέσους που στις περισσότερες περιπτώσεις παρέμειναν κοντά στη μηδενική μεταβολή. Συνεπώς, η μετάβαση από τις κατηγορίες μείωσης προς τις κατηγορίες αύξησης της θερμοκρασίας δεν συνοδευόταν γενικά από συνεχή και μονοτονική μετατόπιση της ΔSO_2 . Το εύρημα αυτό είναι συμβατό με τις χαμηλές τιμές συσχέτισης και προσδιορισμού που καταγράφηκαν στην προηγούμενη ανάλυση των ημερήσιων διαφορών. Στον σταθμό Αριστοτέλους, το σαφέστερο πρότυπο εμφανίστηκε κατά το καλοκαίρι. Οι κατηγορίες έντονης και μέτριας μείωσης της θερμοκρασίας παρουσίασαν αρνητικότερες διαμέσους της ΔSO_2 , ενώ στις κατηγορίες μικρής μεταβολής και αύξησης οι διάμεσοι μετατοπίστηκαν προς τη μηδενική ή τη θετική περιοχή. Η διάταξη αυτή συμφωνεί με τη θετική θερινή σχέση μεταξύ ΔT και ΔSO_2 που είχε καταγραφεί μέσω της γραμμικής παλινδρόμησης. Αντίθετα, τον χειμώνα, την άνοιξη και το φθινόπωρο οι διαφοροποιήσεις ήταν μικρότερες και δεν ακολούθησαν σταθερή διαβάθμιση.

Στην Ελευσίνα, η χειμερινή περίοδος παρουσίασε την πιο διακριτή αρνητική μετατόπιση. Καθώς η ΔT μετακινούνταν από τις κατηγορίες μείωσης προς τις κατηγορίες αύξησης, οι διάμεσοι της ΔSO_2 εμφάνιζαν τάση προς αρνητικότερες τιμές, με την κατηγορία ισχυρής αύξησης να παρουσιάζει τη χαμηλότερη κεντρική τάση. Η εικόνα αυτή υποστηρίζει το αρνητικό πρόσημο της χειμερινής γραμμικής σχέσης. Κατά το καλοκαίρι παρατηρήθηκε ασθενής αντίστροφη τάση, χωρίς όμως σαφή μονοτονικότητα, ενώ την άνοιξη και το φθινόπωρο οι κατανομές παρέμειναν σε μεγάλο βαθμό επικαλυπτόμενες.

Στον σταθμό Πατησίων, το θερινό πρότυπο ήταν επίσης θετικό, αλλά ασθενέστερο από εκείνο της Αριστοτέλους. Η κατηγορία ισχυρής μείωσης της θερμοκρασίας εμφάνισε αρνητικότερη διάμεσο, ενώ οι ενδιάμεσες κατηγορίες και οι κατηγορίες αύξησης συγκεντρώθηκαν πλησιέστερα στη μηδενική μεταβολή ή σε ελαφρώς θετικές τιμές. Κατά τον χειμώνα και το φθινόπωρο δεν παρατηρήθηκε αντίστοιχη συστηματική διάταξη, ενώ την άνοιξη οι διαφοροποιήσεις ήταν περιορισμένες και μη μονοτονικές.

Ένα πρόσθετο χαρακτηριστικό των διαγραμμάτων είναι η παρουσία πολλών τιμών εκτός των απολήξεων, ιδιαίτερα στις πολυπληθέστερες ενδιάμεσες κατηγορίες. Οι τιμές αυτές υποδηλώνουν ότι μεμονωμένα επεισόδια μεγάλης αύξησης ή μείωσης του SO_2 μπορούν να εμφανιστούν ακόμη και όταν η θερμοκρασία μεταβάλλεται ελάχιστα. Επομένως, η κατεύθυνση της ΔT δεν αρκεί για να διαχωρίσει πλήρως τις ημέρες με διαφορετική συμπεριφορά της ΔSO_2 .

Η ερμηνεία των ακραίων κατηγοριών απαιτεί ιδιαίτερη προσοχή, επειδή σε αρκετές εποχές ο αριθμός των παρατηρήσεων ήταν μικρός. Ενδεικτικά, οι κατηγορίες ισχυρής αύξησης ή ισχυρής μείωσης περιλάμβαναν σε ορισμένες περιπτώσεις λιγότερες από 15 παρατηρήσεις. Ως αποτέλεσμα, οι διάμεσοι και το εύρος των αντίστοιχων πλαισίων είναι περισσότερο ευαίσθητα σε μεμονωμένες τιμές και δεν διαθέτουν την ίδια σταθερότητα με τις εκτιμήσεις των πολυπληθέστερων κατηγοριών μικρής ή μέτριας μεταβολής.

Από την κατηγοριοποιημένη ανάλυση προέκυψαν δύο κυρίως εποχικές διαφοροποιήσεις: η θετικότερη θερινή μετατόπιση της ΔSO_2 στην Αριστοτέλους και, ασθενέστερα, στην Πατησίων, καθώς και η αρνητικότερη χειμερινή μετατόπιση στην Ελευσίνα. Στις υπόλοιπες περιπτώσεις, η έντονη επικάλυψη των κατανομών και η απουσία σταθερής μονοτονικής διάταξης δεν επέτρεψαν την ανάδειξη ενός κοινού χωρικού προτύπου. Η ημερήσια μεταβολή της θερμοκρασίας φαίνεται, επομένως, να συνδέεται μόνο με περιορισμένες μετατοπίσεις της κεντρικής τάσης της ΔSO_2 , χωρίς να εξηγεί επαρκώς τη συνολική ημερήσια συμπεριφορά του ρύπου.

4.9.4 Συγκριτική παρουσίαση των αποτελεσμάτων για το SO_2

Η συγκριτική αποτίμηση των αποτελεσμάτων επιτρέπει να εξεταστεί αν η σχέση μεταξύ θερμοκρασίας και SO_2 εμφανίζει παρόμοια συμπεριφορά στις δύο χρονικές κλίμακες της ανάλυσης. Η προσέγγιση των ημερήσιων μέσων τιμών αποτυπώνει ευρύτερες εποχικές και χρονικές συνδιακυμάνσεις, ενώ η ανάλυση των διαφορών μεταξύ διαδοχικών ημερών επικεντρώνεται στις βραχυχρόνιες μεταβολές των δύο μεγεθών. Η παράλληλη εξέτασή τους συμβάλλει στην αξιολόγηση όχι μόνο της κατεύθυνσης και της έντασης των σχέσεων, αλλά και του βαθμού στον οποίο αυτές διατηρούνται όταν περιορίζεται η επίδραση της κοινής εποχικής διακύμανσης και αναδεικνύονται περισσότερο οι άμεσες ημερήσιες μεταβολές.

Για κάθε συνδυασμό σταθμού και εποχής παρατίθενται ο αριθμός των παρατηρήσεων, ο συντελεστής συσχέτισης Pearson r , η μη τυποποιημένη κλίση της απλής γραμμικής παλινδρόμησης β , η τιμή στατιστικής σημαντικότητας p και ο συντελεστής προσδιορισμού R^2 . Η συνεκτίμηση των δεικτών αυτών επιτρέπει τη σύγκριση της κατεύθυνσης, του μεγέθους και της ερμηνευτικής ικανότητας των επιμέρους γραμμικών σχέσεων, καθώς και τον εντοπισμό διαφοροποιήσεων μεταξύ σταθμών και εποχών. Παράλληλα, διευκολύνει

την αναγνώριση περιπτώσεων στις οποίες μία σχέση εμφανίζεται στα ημερήσια μέσα επίπεδα, αλλά εξασθενεί ή μεταβάλλεται όταν εξετάζονται οι ημερήσιες μεταβολές.

Τα αποτελέσματα των ημερήσιων μέσων τιμών παρουσιάζονται στον Πίνακα 4.12, ενώ τα αντίστοιχα αποτελέσματα των ημερήσιων μεταβολών στον Πίνακα 4.13.

Πίνακας 4.12. Συγκεντρωτικά αποτελέσματα της σχέσης μεταξύ ημερήσιας μέσης θερμοκρασίας και ημερήσιας μέσης συγκέντρωσης SO ₂ ανά σταθμό και εποχή, κατά την περίοδο 2016–2024.						
Σταθμός	Εποχή	n	r	β ₁	p	R ²
Αριστοτέλους	Χειμώνας	669	0,108	0,077	0,005	0,012
	Άνοιξη	651	0,316	0,204	< 0,001	0,100
	Καλοκαίρι	707	0,147	0,153	< 0,001	0,022
	Φθινόπωρο	581	0,238	0,122	< 0,001	0,057
Ελευσίνα	Χειμώνας	530	0,131	0,169	0,002	0,017
	Άνοιξη	596	0,162	0,220	< 0,001	0,026
	Καλοκαίρι	574	0,036	0,054	0,393	0,001
	Φθινόπωρο	545	0,069	0,089	0,106	0,005
Πατήσια	Χειμώνας	680	-0,116	-0,143	0,002	0,013
	Άνοιξη	766	0,114	0,095	0,002	0,013
	Καλοκαίρι	741	-0,192	-0,207	< 0,001	0,037
	Φθινόπωρο	711	-0,031	-0,021	0,408	0,001

Πίνακας 4.12. Συγκεντρωτικά αποτελέσματα της σχέσης μεταξύ της ημερήσιας μέσης θερμοκρασίας και της ημερήσιας μέσης συγκέντρωσης SO₂ ανά σταθμό και εποχή, κατά την περίοδο 2016–2024.

Πίνακας 4.13. Συγκεντρωτικά αποτελέσματα της σχέσης μεταξύ της ημερήσιας μεταβολής της θερμοκρασίας (ΔT) και της ημερήσιας μεταβολής της συγκέντρωσης SO_2 (ΔSO_2) ανά σταθμό και εποχή, κατά την περίοδο 2016–2024.						
Σταθμός	Εποχή	n	r	β_1	p	R^2
Αριστοτέλους	Χειμώνας	642	-0,071	-0,060	0,072	0,005
	Άνοιξη	636	0,064	0,081	0,109	0,004
	Καλοκαίρι	672	0,225	0,344	< 0,001	0,050
	Φθινόπωρο	554	0,047	0,044	0,268	0,002
Ελευσίνα	Χειμώνας	515	-0,218	-0,332	< 0,001	0,048
	Άνοιξη	589	-0,079	-0,241	0,055	0,006
	Καλοκαίρι	568	0,111	0,192	0,008	0,012
	Φθινόπωρο	541	0,012	0,042	0,784	0,000
Πατήσια	Χειμώνας	665	-0,091	-0,105	0,019	0,008
	Άνοιξη	748	0,090	0,092	0,014	0,008
	Καλοκαίρι	730	0,135	0,126	< 0,001	0,018
	Φθινόπωρο	688	0,064	0,063	0,095	0,004

Πίνακας 4.13. Συγκεντρωτικά αποτελέσματα της σχέσης μεταξύ της ημερήσιας μεταβολής της θερμοκρασίας και της ημερήσιας μεταβολής της συγκέντρωσης SO_2 ανά σταθμό και εποχή, κατά την περίοδο 2016–2024.

Σημείωση: n = αριθμός παρατηρήσεων, r = συντελεστής συσχέτισης Pearson, β = κλίση της απλής γραμμικής παλινδρόμησης, p = τιμή στατιστικής σημαντικότητας και R^2 = συντελεστής προσδιορισμού.

Η ανάλυση των ημερήσιων μέσων τιμών δεν ανέδειξε ενιαίο χωρικό πρότυπο. Στην Αριστοτέλους, η σχέση παρέμεινε θετική σε όλες τις εποχές, αλλά η έντασή της μεταβλήθηκε αισθητά. Η ισχυρότερη συσχέτιση καταγράφηκε την άνοιξη, με $r=0,316$, $\beta=0,204$ και $R^2=0,100$, ενώ το φθινόπωρο ακολούθησε ασθενέστερη αλλά σαφώς θετική σχέση. Κατά τον χειμώνα και το καλοκαίρι οι συσχετίσεις ήταν μικρότερες και η ερμηνευτική ικανότητα των μοντέλων παρέμεινε περιορισμένη.

Η Ελευσίνα παρουσίασε πιο εξασθενημένη εικόνα. Θετικές και στατιστικά σημαντικές σχέσεις καταγράφηκαν μόνο τον χειμώνα και την άνοιξη, με τιμές R^2 ίσες με 0,017 και 0,026 αντίστοιχα. Κατά το καλοκαίρι και το φθινόπωρο η γραμμική σύνδεση ήταν ουσιαστικά αμελητέα. Συνεπώς, στον συγκεκριμένο σταθμό η θερμοκρασία δεν αποτέλεσε σταθερό γραμμικό προσδιοριστικό παράγοντα των ημερήσιων συγκεντρώσεων SO_2 .

Στον σταθμό Πατησίων, η σχέση διαφοροποιήθηκε όχι μόνο ως προς την ένταση αλλά και ως προς το πρόσημο. Τον χειμώνα και το καλοκαίρι καταγράφηκαν αρνητικές συσχετίσεις, με εντονότερη τη θερινή ($r=-0,192$, $R^2=0,037$), ενώ την άνοιξη η σχέση ήταν θετική και το φθινόπωρο πρακτικά μηδενική. Η εναλλαγή αυτή υποδηλώνει ότι η σύνδεση θερμοκρασίας $-SO_2$ στον συγκεκριμένο σταθμό δεν χαρακτηρίζεται από σταθερό εποχικό μηχανισμό.

Η άνοιξη αποτέλεσε τη μοναδική εποχή κατά την οποία εμφανίστηκε θετική και στατιστικά σημαντική σχέση και στους τρεις σταθμούς. Ωστόσο, η έντασή της διέφερε σημαντικά, καθώς ήταν σαφέστερη στην Αριστοτέλους και πολύ ασθενέστερη στην Ελευσίνα και στην Πατησίων. Αντίθετα, το καλοκαίρι ανέδειξε τη μεγαλύτερη χωρική αντίθεση: θετική σχέση στην Αριστοτέλους, ουσιαστικά μηδενική στην Ελευσίνα και αρνητική στην Πατησίων.

Η ανάλυση των ημερήσιων μεταβολών παρουσίασε ακόμη μικρότερη συνοχή. Οι περισσότερες συσχετίσεις ήταν πολύ ασθενείς και οι τιμές του R^2 παρέμειναν κοντά στο μηδέν. Οι δύο σαφέστερες περιπτώσεις ήταν η θετική θερινή σχέση στην Αριστοτέλους ($r=0,225$, $\beta=0,344$, $R^2=0,050$) και η αρνητική χειμερινή σχέση στην Ελευσίνα ($r=-0,218$, $\beta=-0,332$, $R^2=0,048$). Ακόμη και σε αυτές τις περιπτώσεις, όμως, η μεταβολή της θερμοκρασίας απέδωσε λιγότερο από το 5% της μεταβλητότητας της ΔSO_2 .

Σε εποχικό επίπεδο, ο χειμώνας χαρακτηρίστηκε από αρνητικό πρόσημο και στους τρεις σταθμούς, ενώ το καλοκαίρι από θετικό. Η συμφωνία αυτή αφορά κυρίως την κατεύθυνση και όχι την ένταση των σχέσεων. Στην Αριστοτέλους και στην Ελευσίνα οι χειμερινές και θερινές σχέσεις ήταν σαφέστερες, ενώ στην Πατησίων παρέμειναν πολύ ασθενείς, με R^2 που δεν υπερέβη το 0,018. Κατά την άνοιξη και το φθινόπωρο οι συσχετίσεις ήταν ως επί το πλείστον περιορισμένες ή μη στατιστικά σημαντικές.

Τα διαγράμματα πλαισίου και απολήξεων των Σχημάτων 4.73–4.75 υποστήριξαν τις ίδιες βασικές τάσεις, χωρίς όμως να αποκαλύψουν καθαρό διαχωρισμό των κατανομών. Η θερινή μετάβαση από αρνητικότερες τιμές ΔSO_2 στις κατηγορίες μείωσης της θερμοκρασίας προς θετικότερες τιμές στις κατηγορίες αύξησης ήταν περισσότερο εμφανής στην Αριστοτέλους και, σε μικρότερο βαθμό, στην Πατησίων. Αντίθετα, στην Ελευσίνα κατά τον χειμώνα εμφανίστηκε η αντίστροφη διάταξη. Στις υπόλοιπες περιπτώσεις, οι έντονες επικαλύψεις των πλαισίων και η μη μονοτονική μεταβολή των διαμέσων δεν υποστήριξαν ένα σταθερό κατηγοριοποιημένο πρότυπο.

Η σύγκριση των δύο χρονικών κλιμάκων δείχνει ότι οι ισχυρότερες σχέσεις εμφανίστηκαν στα ημερήσια μέσα επίπεδα και όχι στις ημερήσιες διαφορές. Η μέγιστη τιμή του R^2

μειώθηκε από 0,100 στην πρώτη προσέγγιση σε 0,050 στη δεύτερη. Η διαφοροποίηση αυτή υποδηλώνει ότι μέρος της σχέσης που αποτυπώνεται στα ημερήσια μέσα επίπεδα ενδέχεται να συνδέεται με ευρύτερα εποχικά ή χρονικά πρότυπα, τα οποία εξασθενούν όταν εξετάζεται αποκλειστικά η μεταβολή από ημέρα σε ημέρα.

Η στατιστική σημαντικότητα αρκετών επιμέρους σχέσεων πρέπει να ερμηνεύεται σε συνδυασμό με το μεγάλο μέγεθος των δειγμάτων και τις χαμηλές τιμές του R^2 . Επομένως, η ύπαρξη τιμών $p < 0,05$ δεν ισοδυναμεί με ισχυρή ή πρακτικά σημαντική γραμμική σύνδεση. Στις περισσότερες περιπτώσεις, η θερμοκρασία ή η ημερήσια μεταβολή της εξηγούσε μόνο πολύ μικρό μέρος της μεταβλητότητας του SO_2 .

Η σχέση θερμοκρασίας- SO_2 παρουσίασε έντονη εξάρτηση από τη θέση, την εποχή και τη χρονική κλίμακα της ανάλυσης, χωρίς να διαμορφώνεται κοινό και αναπαραγώγιμο πρότυπο για το σύνολο των σταθμών. Η Αριστοτέλους εμφάνισε περισσότερο συνεπή θετική συμπεριφορά στις ημερήσιες μέσες τιμές, η Ελευσίνα ασθενείς και εποχικά περιορισμένες σχέσεις, ενώ στην Πατησίων παρατηρήθηκαν συχνές μεταβολές του προσήμου. Στη βραχυχρόνια κλίμακα οι σχέσεις εξασθένησαν ακόμη περισσότερο. Τα ευρήματα δείχνουν ότι η θερμοκρασία δεν αποτελεί ισχυρό αυτοτελή γραμμικό παράγοντα της ημερήσιας ή βραχυχρόνιας μεταβλητότητας του SO_2 και ότι η ερμηνεία των παρατηρούμενων συσχετίσεων απαιτεί τη συνεκτίμηση των πηγών εκπομπής, των μετεωρολογικών συνθηκών και των τοπικών χαρακτηριστικών κάθε σταθμού.

4.10 Συγκριτική σύνθεση των αποτελεσμάτων για τη σχέση θερμοκρασίας και ατμοσφαιρικών ρύπων

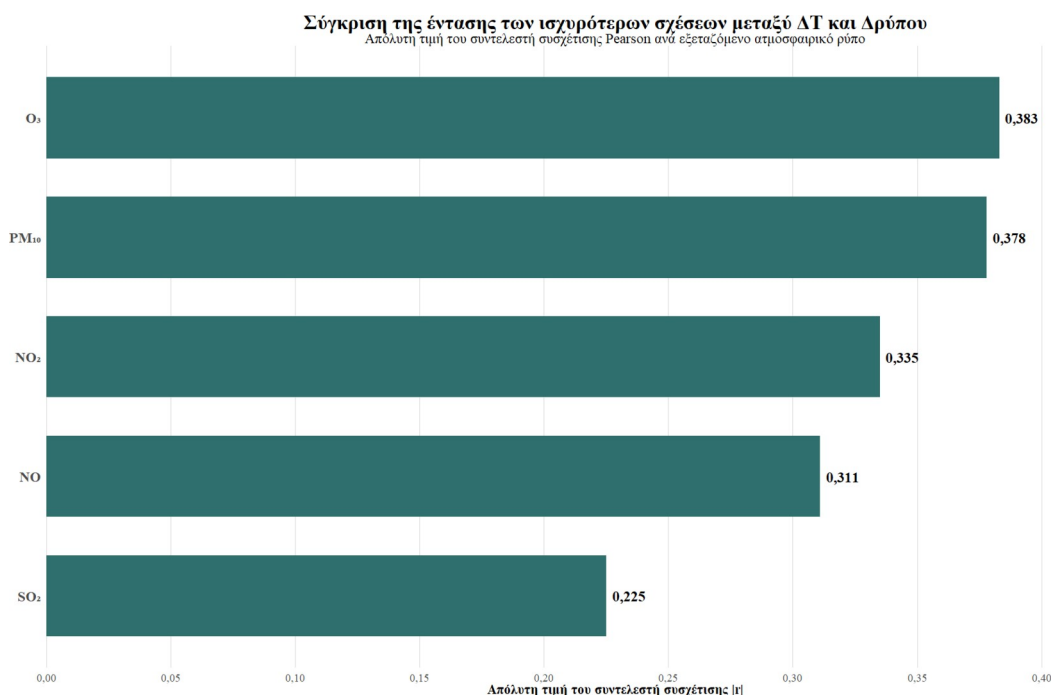
Μετά την ολοκλήρωση των επιμέρους αναλύσεων, τα αποτελέσματα συνεξετάστηκαν ανά ρύπο, εποχή και σταθμό, προκειμένου να αποτυπωθεί συνολικά η βραχυχρόνια σχέση μεταξύ της ημερήσιας μεταβολής της θερμοκρασίας και της ημερήσιας μεταβολής των ατμοσφαιρικών συγκεντρώσεων. Η συγκριτική αυτή προσέγγιση μετατοπίζει το ενδιαφέρον από την αυτοτελή εξέταση κάθε ρύπου προς την αναζήτηση κοινών ή διαφοροποιημένων προτύπων ως προς την ένταση, την κατεύθυνση, την εποχικότητα και τη χωρική έκφραση των σχέσεων.

Η σύνθεση επικεντρώνεται στα μοντέλα των πρώτων διαφορών, καθώς αυτά περιγράφουν τη συνδιακύμανση των δύο μεγεθών από τη μία ημέρα στην επόμενη και περιορίζουν την επίδραση των βραδύτερων χρονικών και εποχικών μεταβολών. Για κάθε ρύπο επιλέχθηκε ο συνδυασμός σταθμού και εποχής με τη μεγαλύτερη απόλυτη τιμή του συντελεστή συσχέτισης Pearson. Για τις επιλεγμένες περιπτώσεις παρουσιάζονται η κατεύθυνση της σχέσης, ο συντελεστής r , η μη τυποποιημένη κλίση β , η τιμή p και ο συντελεστής προσδιορισμού R^2 .

Η επιλογή των μέγιστων απόλυτων τιμών του r δεν αποσκοπεί στη δημιουργία γενικής κατάταξης της «θερμοκρασιακής ευαισθησίας» των ρύπων. Αποτελεί περιγραφική σύγκριση των εντονότερων επιμέρους σχέσεων που καταγράφηκαν στο διαθέσιμο σύνολο δεδομένων. Οι περιπτώσεις αυτές δεν αντιπροσωπεύουν αναγκαστικά τη συνήθη συμπεριφορά κάθε ρύπου ούτε τη σταθερότητα της σχέσης σε όλες τις εποχές και σε όλους τους σταθμούς. Επιπλέον, οι τιμές της κλίσης β δεν είναι άμεσα συγκρίσιμες μεταξύ διαφορετικών ρύπων, λόγω των διαφορετικών επιπέδων και της διαφορετικής διασποράς των συγκεντρώσεών τους.

Πίνακας 4.14. Συγκριτική παρουσίαση των ισχυρότερων σχέσεων μεταξύ της ημερήσιας μεταβολής της θερμοκρασίας και της ημερήσιας μεταβολής των συγκεντρώσεων των εξεταζόμενων ατμοσφαιρικών ρύπων, κατά την περίοδο 2016–2024.							
Ρύπος	Εποχή ισχυρότερης σχέσης	Σταθμός	Κατεύθυνση	r	β	p	R^2
<u>NO</u>	Χειμώνας	Λυκόβρυση	Αρνητική	-0,311	-2,215	< 0,001	0,097
<u>NO₂</u>	Χειμώνας	Λυκόβρυση	Αρνητική	-0,335	-1,798	< 0,001	0,112
<u>O₃</u>	Χειμώνας	Λυκόβρυση	Θετική	0,383	2,602	< 0,001	0,147
<u>PM₁₀</u>	Καλοκαίρι	Λυκόβρυση	Θετική	0,378	2,271	< 0,001	0,143
<u>SO₂</u>	Καλοκαίρι	Αριστοτέλους	Θετική	0,225	0,344	< 0,001	0,050

Πίνακας 4.14. Συγκριτική παρουσίαση των ισχυρότερων σχέσεων μεταξύ της ημερήσιας μεταβολής της θερμοκρασίας και της ημερήσιας μεταβολής των συγκεντρώσεων των εξεταζόμενων ατμοσφαιρικών ρύπων, κατά την περίοδο 2016–2024.



Σχήμα 4.76. Σύγκριση της απόλυτης τιμής του συντελεστή συσχέτισης Pearson για την ισχυρότερη σχέση μεταξύ της ημερήσιας μεταβολής της θερμοκρασίας και της ημερήσιας μεταβολής της συγκέντρωσης κάθε εξεταζόμενου ρύπου.

Η συγκριτική κατάταξη με βάση την απόλυτη τιμή του r ανέδειξε σχετικά περιορισμένο εύρος διαφοροποίησης μεταξύ των τεσσάρων ισχυρότερων περιπτώσεων. Η υψηλότερη συσχέτιση καταγράφηκε για το O₃ στη Λυκόβρυση κατά τον χειμώνα, με $r=0,383$, $\beta=2,602$ και $R^2=0,147$. Πολύ κοντά ακολούθησαν τα PM₁₀ στον ίδιο σταθμό κατά το καλοκαίρι, με $r=0,378$, $\beta=2,271$ και $R^2=0,143$. Οι δύο αυτές περιπτώσεις αντιπροσωπεύουν τις εντονότερες θετικές βραχυχρόνιες συνδιακυμάνσεις του συνόλου των αναλύσεων. Οι ισχυρότερες σχέσεις για το NO₂ και το NO εμφανίστηκαν επίσης στη Λυκόβρυση κατά τον χειμώνα, αλλά είχαν αρνητικό πρόσημο. Για το NO₂ καταγράφηκαν $r=-0,335$, $\beta=-1,798$ και $R^2=0,112$, ενώ για το NO προέκυψαν $r=-0,311$, $\beta=-2,215$ και $R^2=0,097$. Επομένως, στον ίδιο σταθμό και κατά την ίδια εποχή, η αύξηση της θερμοκρασίας από τη

μία ημέρα στην επόμενη συνδέθηκε με αύξηση του O_3 , αλλά με μείωση του NO και του NO_2 .

Η αντίθετη αυτή κατεύθυνση αποτελεί σημαντικό εύρημα της συγκριτικής σύνθεσης. Το O_3 και τα οξείδια του αζώτου δεν διαφοροποιήθηκαν μόνο ως προς την ένταση της σχέσης, αλλά παρουσίασαν αντίθετη βραχυχρόνια συμπεριφορά. Το αποτέλεσμα είναι συμβατό με τη διαφορετική ατμοσφαιρική και φωτοχημική συμπεριφορά των συγκεκριμένων ρύπων. Ωστόσο, η παρούσα ανάλυση δεν επιτρέπει να αποδοθούν οι παρατηρούμενες σχέσεις σε έναν συγκεκριμένο φωτοχημικό, εκπομπικό ή μετεωρολογικό μηχανισμό.

Το SO_2 διαφοροποιήθηκε από τους υπόλοιπους ρύπους, καθώς ακόμη και η ισχυρότερη επιμέρους σχέση του ήταν αισθητά ασθενέστερη. Η μέγιστη συσχέτιση καταγράφηκε στην Αριστοτέλους κατά το καλοκαίρι, με $r=0,225$, $\beta=0,344$ και $R^2=0,050$. Ακόμη και σε αυτή την περίπτωση, το απλό γραμμικό μοντέλο περιέγραψε μόλις το 5,0% της μεταβλητότητας της ΔSO_2 , γεγονός που επιβεβαιώνει την περιορισμένη ερμηνευτική ικανότητα της θερμοκρασιακής μεταβολής όταν εξετάζεται μεμονωμένα.

Η συγκέντρωση τεσσάρων από τις πέντε μέγιστες σχέσεις στη Λυκόβρυση αποτελεί αξιοσημείωτο χωρικό εύρημα. Δεν σημαίνει ότι ο συγκεκριμένος σταθμός παρουσιάζει γενικά ισχυρότερη εξάρτηση όλων των ρύπων από τη θερμοκρασία. Δείχνει, όμως, ότι στο διαθέσιμο σύνολο δεδομένων οι εντονότερες βραχυχρόνιες συνδιακυμάνσεις καταγράφηκαν συχνότερα στη συγκεκριμένη θέση. Η εικόνα αυτή μπορεί να συνδέεται με τη σύνθεση των πηγών, τις τοπικές συνθήκες διασποράς, τη μορφολογία της περιοχής, τη μεταφορά αέριων μαζών ή τους περιορισμούς της χωρικής αντιστοίχισης του σταθμού ρύπανσης με τον αντίστοιχο μετεωρολογικό σταθμό.

Ως προς την εποχικότητα, οι ισχυρότερες σχέσεις του NO , του NO_2 και του O_3 καταγράφηκαν κατά τον χειμώνα, ενώ εκείνες των PM_{10} και του SO_2 κατά το καλοκαίρι. Η κατανομή αυτή δεν υποστηρίζει την ύπαρξη μιας κοινής εποχής κατά την οποία οι ημερήσιες θερμοκρασιακές μεταβολές συνδέονται με παρόμοιο τρόπο με όλους τους ρύπους. Αντίθετα, δείχνει ότι η εντονότερη έκφραση της σχέσης εξαρτάται από τα ιδιαίτερα χαρακτηριστικά κάθε ρύπου και από το εποχικό πλαίσιο μέσα στο οποίο διαμορφώνονται οι συγκεντρώσεις του.

Ως προς την κατεύθυνση, το O_3 , τα PM_{10} και το SO_2 εμφάνισαν θετικές μέγιστες συσχετίσεις, ενώ το NO και το NO_2 αρνητικές. Η διαφοροποίηση αυτή δείχνει ότι η ίδια μεταβολή της θερμοκρασίας δεν συνοδεύεται από παράλληλη απόκριση όλων των

ατμοσφαιρικών συστατικών. Επειδή, όμως, στα μοντέλα εξετάζεται μόνο η θερμοκρασία, δεν μπορεί να διακριθεί σε ποιον βαθμό οι σχέσεις συνδέονται με αυτήν ή με ταυτόχρονες μεταβολές του ανέμου, της υγρασίας, της βροχόπτωσης, της ηλιακής ακτινοβολίας, της ατμοσφαιρικής διασποράς και των εκπομπών.

Παρά τις επιμέρους διαφοροποιήσεις, κοινό χαρακτηριστικό όλων των μέγιστων σχέσεων ήταν η περιορισμένη ερμηνευτική ικανότητα των γραμμικών μοντέλων. Η υψηλότερη τιμή του R^2 ήταν 0,147, γεγονός που σημαίνει ότι ακόμη και το ισχυρότερο μοντέλο περιέγραψε λιγότερο από το 15% της ημερήσιας μεταβλητότητας του αντίστοιχου ρύπου. Το μεγαλύτερο μέρος της διακύμανσης παρέμεινε, επομένως, εκτός των απλών γραμμικών μοντέλων.

Η συγκριτική σύνθεση δείχνει ότι η βραχυχρόνια σχέση μεταξύ θερμοκρασίας και ατμοσφαιρικών ρύπων εξαρτάται από τον συγκεκριμένο συνδυασμό ρύπου, εποχής και σταθμού. Δεν προκύπτει ενιαία ή καθολική απόκριση της ατμοσφαιρικής ρύπανσης στις ημερήσιες θερμοκρασιακές μεταβολές. Τα ευρήματα αποτυπώνουν επιμέρους, χωρικά και εποχικά διαφοροποιημένες συνδιακυμάνσεις, οι οποίες πρέπει να ερμηνεύονται στο πλαίσιο ενός πολυπαραγοντικού ατμοσφαιρικού συστήματος.

Η ενσωμάτωση πρόσθετων παραμέτρων, όπως η ταχύτητα και η διεύθυνση του ανέμου, η σχετική υγρασία, η βροχόπτωση, η ηλιακή ακτινοβολία, το ύψος του ατμοσφαιρικού οριακού στρώματος, οι πηγές εκπομπής και πιθανές χρονικές υστερήσεις, θα επέτρεπε πληρέστερη διερεύνηση των μηχανισμών που συνδέονται με τις παρατηρούμενες σχέσεις.

4.11 Σύνοψη βασικών ευρημάτων

Η συνολική αξιολόγηση των αποτελεσμάτων της περιόδου 2016–2024 έδειξε ότι η σχέση μεταξύ θερμοκρασίας και ατμοσφαιρικών ρύπων στο λεκανοπέδιο της Αθήνας διαφοροποιείται σημαντικά ανάλογα με τον ρύπο, την εποχή, τον σταθμό και τη χρονική κλίμακα της ανάλυσης. Δεν προέκυψε ένα ενιαίο πρότυπο που να διατηρείται σταθερό σε όλες τις περιπτώσεις. Αντίθετα, η κατεύθυνση και η ένταση των σχέσεων μεταβάλλονταν ανάλογα με τα ιδιαίτερα χαρακτηριστικά κάθε ρύπου και του αντίστοιχου περιβάλλοντος μέτρησης.

Στις ημερήσιες μέσες τιμές, το O_3 παρουσίασε τις σαφέστερες θετικές σχέσεις με τη θερμοκρασία, ενώ θετικές σχέσεις εμφανίστηκαν σε αρκετές περιπτώσεις και για τα PM_{10} . Αντίθετα, το NO και το NO_2 εμφάνισαν συχνότερα αρνητικές σχέσεις, ιδιαίτερα σε ψυχρότερες εποχές και σε ορισμένους σταθμούς. Το SO_2 παρουσίασε γενικά ασθενέστερη και λιγότερο σταθερή συμπεριφορά, χωρίς να διαμορφώνεται συνεπές χωρικό ή εποχικό πρότυπο.

Οι σχέσεις μεταξύ των ημερήσιων μεταβολών της θερμοκρασίας και των αντίστοιχων μεταβολών των συγκεντρώσεων ήταν στις περισσότερες περιπτώσεις ασθενέστερες. Το εύρημα αυτό δείχνει ότι μέρος των σχέσεων που καταγράφονται στις ημερήσιες μέσες τιμές συνδέεται με την κοινή εποχική τους εξέλιξη, ενώ οι βραχυχρόνιες μεταβολές από τη μία ημέρα στην επόμενη εξηγούνται σε μεγάλο βαθμό από πρόσθετους παράγοντες. Η χρήση των πρώτων διαφορών ανέδειξε επομένως πιο περιορισμένες και περισσότερο μεταβαλλόμενες βραχυχρόνιες συνδιακυμάνσεις.

Η εποχική διαφοροποίηση ήταν ιδιαίτερα έντονη. Οι θετικές σχέσεις του O_3 ήταν γενικά σαφέστερες κατά τις θερμότερες περιόδους, ενώ για το NO και το NO_2 εμφανίστηκαν συχνότερα αρνητικές σχέσεις κατά τον χειμώνα και το φθινόπωρο. Στα PM_{10} διακρίθηκε σε αρκετές περιπτώσεις θετικό θερινό πρότυπο, ενώ το SO_2 δεν παρουσίασε σταθερή εποχική συμπεριφορά. Τα ευρήματα αυτά δείχνουν ότι η μέγιστη ένταση της σχέσης δεν εμφανίζεται στην ίδια εποχή για όλους τους ρύπους.

Εξίσου σημαντική ήταν η χωρική διαφοροποίηση. Οι σχέσεις δεν εμφάνισαν την ίδια κατεύθυνση ή ένταση σε όλους τους σταθμούς, γεγονός που υπογραμμίζει τη σημασία των τοπικών πηγών εκπομπής, των συνθηκών διασποράς, της φωτοχημικής δραστηριότητας και της μεταφοράς αέριων μαζών. Η συχνή εμφάνιση της Λυκόβρυσης μεταξύ των ισχυρότερων βραχυχρόνιων σχέσεων αποτελεί χαρακτηριστικό παράδειγμα αυτής της χωρικής διαφοροποίησης, χωρίς να υποδηλώνει καθολικά ισχυρότερη εξάρτηση όλων των ρύπων από τη θερμοκρασία.

Οι περισσότερες τιμές του R^2 παρέμειναν χαμηλές ή μέτριες. Επομένως, ακόμη και όταν οι σχέσεις ήταν στατιστικά σημαντικές, η θερμοκρασία ή η ημερήσια μεταβολή της περιέγραφε μόνο περιορισμένο μέρος της μεταβλητότητας των συγκεντρώσεων. Η στατιστική σημαντικότητα δεν πρέπει, συνεπώς, να ταυτίζεται με υψηλή πρακτική ή προβλεπτική ικανότητα. Το μεγαλύτερο μέρος της διακύμανσης των ρύπων παρέμεινε εκτός των απλών γραμμικών μοντέλων που εφαρμόστηκαν.

Συνολικά, η θερμοκρασία συνδέεται με μέρος της χρονικής μεταβλητότητας των εξεταζόμενων ρύπων, αλλά δεν αποτελεί επαρκή μεμονωμένο παράγοντα για την ερμηνεία της ποιότητας του αέρα. Το βασικό συμπέρασμα του κεφαλαίου είναι ότι η σχέση θερμοκρασίας και ατμοσφαιρικής ρύπανσης είναι ρυποεξαρτώμενη, εποχικά και χωρικά μεταβαλλόμενη και πρέπει να ερμηνεύεται στο πλαίσιο ενός πολυπαραγοντικού ατμοσφαιρικού συστήματος. Για την πληρέστερη κατανόηση των παρατηρούμενων σχέσεων απαιτείται η συνεκτίμηση πρόσθετων μετεωρολογικών, εκπομπικών και χωρικών παραμέτρων.

5. Συμπεράσματα

5.1 Συνοπτική αποτίμηση της έρευνας

Η παρούσα διπλωματική εργασία διερεύνησε τη σχέση μεταξύ της θερμοκρασίας και της ατμοσφαιρικής ρύπανσης στο λεκανοπέδιο της Αθήνας κατά την περίοδο 2016–2024. Εξετάστηκαν η ημερήσια μέση θερμοκρασία και η μεταβολή της μεταξύ διαδοχικών ημερών σε συνάρτηση με τις συγκεντρώσεις και τις αντίστοιχες ημερήσιες μεταβολές των ρύπων NO , NO_2 , O_3 , PM_{10} και SO_2 .

Η ανάλυση βασίστηκε σε δεδομένα πέντε σταθμών παρακολούθησης, οι οποίοι αντιπροσωπεύουν διαφορετικά χωρικά και λειτουργικά περιβάλλοντα του λεκανοπεδίου: την Αριστοτέλους, την Πατησίων, την Ελευσίνα, τη Λυκόβρυση και τους Θρακομακεδόνες.

Η διαφοροποίηση των σταθμών ως προς τον αστικό, κυκλοφοριακό, προαστιακό, περιαστικό ή βιομηχανικά επηρεασμένο χαρακτήρα τους επέτρεψε τη διερεύνηση της χωρικής μεταβλητότητας των σχέσεων. Παράλληλα, η εποχική στρωματοποίηση των δεδομένων κατέστησε δυνατή την αποτύπωση διαφοροποιήσεων που συνδέονται με τη φωτοχημική δραστηριότητα, τις εκπομπές και τις συνθήκες ατμοσφαιρικής διασποράς.

Η μεθοδολογική προσέγγιση αναπτύχθηκε σε δύο χρονικές κλίμακες. Η πρώτη εξέτασε τη συνδιακύμανση της ημερήσιας μέσης θερμοκρασίας με τις ημερήσιες μέσες συγκεντρώσεις των ρύπων, αποτυπώνοντας και την ευρύτερη εποχική διακύμανση. Η δεύτερη επικεντρώθηκε στις μεταβολές μεταξύ πραγματικά διαδοχικών ημερών, περιορίζοντας την επίδραση των απόλυτων επιπέδων και επιτρέποντας πιο στοχευμένη εξέταση της βραχυχρόνιας δυναμικής.

Το κεντρικό συμπέρασμα είναι ότι η σχέση θερμοκρασίας–ατμοσφαιρικής ρύπανσης δεν ακολουθεί ενιαίο και χωρικά ομοιόμορφο πρότυπο. Η κατεύθυνση και η ένταση των συσχετίσεων διαφοροποιήθηκαν ανάλογα με τον ρύπο, την εποχή, τον σταθμό και τη χρονική κλίμακα της ανάλυσης. Παρότι σε αρκετές περιπτώσεις καταγράφηκαν στατιστικά σημαντικές σχέσεις, οι περισσότερες ήταν πολύ ασθενείς ή ασθενείς και συνοδεύονταν από χαμηλές τιμές του συντελεστή προσδιορισμού.

Οι ημερήσιες μέσες τιμές ανέδειξαν σαφέστερες θετικές σχέσεις κυρίως για το O_3 και τα PM_{10} , ενώ για το NO και το NO_2 παρατηρήθηκαν συχνότερα αρνητικές συσχετίσεις σε συγκεκριμένες εποχές και θέσεις. Το SO_2 εμφάνισε ασθενέστερη και λιγότερο σταθερή συμπεριφορά. Η ανάλυση των ημερήσιων μεταβολών επιβεβαίωσε ότι η βραχυχρόνια

σύνδεση της θερμοκρασίας με τους ρύπους είναι γενικά περιορισμένη και διαφοροποιείται ως προς το πρόσημο και την έντασή της.

Ακόμη και στις εντονότερες καταγεγραμμένες σχέσεις, τα απλά γραμμικά μοντέλα ερμήνευσαν μικρό μόνο μέρος της μεταβλητότητας των συγκεντρώσεων. Το εύρημα αυτό δείχνει ότι η θερμοκρασία αποτελεί μετρήσιμη, αλλά όχι αυτοτελή ή κυρίαρχη, παράμετρο της ποιότητας του αέρα. Η στατιστική σημαντικότητα ορισμένων σχέσεων πρέπει, επομένως, να συνεκτιμάται με το μέγεθος του συντελεστή συσχέτισης, την τιμή του R^2 και την περιβαλλοντική σημασία του αποτελέσματος.

Συνολικά, η ποιότητα της ατμόσφαιρας στο λεκανοπέδιο της Αθήνας προκύπτει από την αλληλεπίδραση πολλαπλών φυσικών, χημικών και ανθρογενών διεργασιών. Η θερμοκρασία επηρεάζει το πλαίσιο μέσα στο οποίο οι ρύποι εκπέμπονται, διασπείρονται, μετασχηματίζονται και συσσωρεύονται, χωρίς όμως να καθορίζει μονοσήμαντα τις συγκεντρώσεις τους. Ως εκ τούτου, η ερμηνεία των παρατηρούμενων σχέσεων απαιτεί συνεκτίμηση του ρύπου, της εποχής, της θέσης μέτρησης και της χρονικής κλίμακας της ανάλυσης.

5.2 Απάντηση στα ερευνητικά ερωτήματα

Η αντιπαραβολή των αποτελεσμάτων με τα ερευνητικά ερωτήματα επιτρέπει την αξιολόγηση του βαθμού επίτευξης των στόχων της εργασίας. Από τις αναλύσεις προέκυψε ότι η θερμοκρασία συνδέθηκε στατιστικά με τις συγκεντρώσεις των εξεταζόμενων ρύπων σε αρκετούς συνδυασμούς σταθμού και εποχής. Οι σχέσεις αυτές, ωστόσο, δεν εμφάνισαν κοινή κατεύθυνση, σταθερή ένταση ή ομοιόμορφη χωρική και εποχική έκφραση.

Η ετερογένεια των αποτελεσμάτων είναι συμβατή με τη διαφορετική προέλευση και φυσικοχημική συμπεριφορά των ρύπων, καθώς και με τις διαφοροποιήσεις στις τοπικές πηγές, στις συνθήκες διασποράς και στα χαρακτηριστικά των σταθμών μέτρησης. Κατά συνέπεια, τα ερευνητικά ερωτήματα απαντώνται μέσω διακριτών συμπερασμάτων ανά χρονική κλίμακα, εποχή και θέση μέτρησης.

5.2.1 Σχέση ημερήσιας μέσης θερμοκρασίας και συγκεντρώσεων των ατμοσφαιρικών ρύπων

Ως προς το πρώτο ερευνητικό ερώτημα, διαπιστώθηκε ότι η ημερήσια μέση θερμοκρασία παρουσίασε στατιστικά σημαντικές σχέσεις με τις ημερήσιες συγκεντρώσεις των εξεταζόμενων ρύπων σε αρκετούς συνδυασμούς σταθμού και εποχής. Οι σχέσεις αυτές δεν συνοδεύτηκαν, όμως, από ενιαίο πρόσημο, παρόμοια ένταση ή σταθερή χωρική και εποχική έκφραση. Επομένως, δεν τεκμηριώθηκε ένα καθολικό πρότυπο σύμφωνα με το οποίο η αύξηση της θερμοκρασίας συνοδεύεται συστηματικά από αύξηση ή μείωση της συνολικής ατμοσφαιρικής ρύπανσης.

Το O_3 παρουσίασε το σαφέστερο θετικό πρότυπο, κυρίως κατά τις θερμότερες και μεταβατικές εποχές. Η συμπεριφορά αυτή είναι συμβατή με τον δευτερογενή φωτοχημικό χαρακτήρα του ρύπου και με τη συχνή συνύπαρξη υψηλότερων θερμοκρασιών, έντονης ηλιακής ακτινοβολίας και αυξημένης φωτοχημικής δραστηριότητας. Ωστόσο, η ένταση των σχέσεων διαφοροποιήθηκε μεταξύ των σταθμών, γεγονός που δείχνει ότι η διαθεσιμότητα πρόδρομων ενώσεων, η μεταφορά αέριων μαζών και οι τοπικές συνθήκες διασποράς επηρεάζουν επίσης τις συγκεντρώσεις του.

Θετικές σχέσεις καταγράφηκαν σε αρκετές περιπτώσεις και για τα PM_{10} , με σαφέστερη παρουσία κατά τη θερινή περίοδο. Το αποτέλεσμα αυτό μπορεί να συνδέεται με την ξηρότητα των επιφανειών, την επαναιώρηση οδικής και εδαφικής σκόνης, τη μειωμένη υγρή απομάκρυνση και την επίδραση φυσικών πηγών. Παρ' όλα αυτά, η ετερογένεια των πηγών των PM_{10} και η δυνατότητα μεταφοράς σωματιδίων από απομακρυσμένες περιοχές δεν επιτρέπουν την απόδοση των θετικών σχέσεων σε έναν μόνο μηχανισμό.

Αντίθετα, το NO και το NO_2 εμφάνισαν συχνότερα αρνητικές σχέσεις, ιδιαίτερα σε ορισμένες ψυχρότερες εποχές και θέσεις. Η εικόνα αυτή είναι συμβατή με την πιθανή ενίσχυση της κατακόρυφης ανάμιξης υπό θερμότερες συνθήκες, με τις εποχικές μεταβολές των εκπομπών και με τη συμμετοχή των δύο ρύπων στον φωτοχημικό κύκλο $NO-NO_2-O_3$. Ωστόσο, η μεταβολή της έντασης και, σε ορισμένες περιπτώσεις, του προσήμου μεταξύ σταθμών δείχνει ότι οι τοπικές εκπομπές και οι συνθήκες αερισμού διαδραματίζουν σημαντικό ρόλο.

Το SO_2 παρουσίασε γενικά τις ασθενέστερες και λιγότερο συνεπείς σχέσεις. Η συμπεριφορά του φαίνεται να εξαρτάται περισσότερο από χωρικά εντοπισμένες βιομηχανικές, ενεργειακές ή λιμενικές πηγές και από τις συνθήκες μεταφοράς και διασποράς. Για τον λόγο

αυτό, η ημερήσια μέση θερμοκρασία, όταν εξετάζεται ως μοναδική ανεξάρτητη μεταβλητή, περιγράφει μόνο περιορισμένο μέρος της μεταβλητότητας των συγκεντρώσεών του.

Τα αποτελέσματα δείχνουν συνολικά ότι η σχέση της ημερήσιας μέσης θερμοκρασίας με τις συγκεντρώσεις εξαρτάται από τον ρύπο, την εποχή, τον χαρακτήρα του σταθμού και το τοπικό περιβάλλον μέτρησης. Παράλληλα, οι σχέσεις των ημερήσιων μέσων τιμών ενσωματώνουν σε κάποιο βαθμό την κοινή εποχική εξέλιξη της θερμοκρασίας και των ρύπων. Συνεπώς, δεν πρέπει να αποδίδονται αποκλειστικά σε άμεσες ημερήσιες μεταβολές της θερμοκρασίας ούτε να ερμηνεύονται χωρίς αναφορά στις υπόλοιπες μετεωρολογικές και εκπομπικές συνθήκες.

Επιπλέον, η στατιστική σημαντικότητα ορισμένων σχέσεων δεν συνοδεύτηκε πάντοτε από υψηλές τιμές συσχέτισης ή R^2 . Αυτό σημαίνει ότι, ακόμη και όταν η σχέση ήταν στατιστικά ανιχνεύσιμη, η ημερήσια μέση θερμοκρασία περιέγραφε συνήθως περιορισμένο μόνο μέρος της μεταβλητότητας των συγκεντρώσεων. Η διάκριση αυτή είναι σημαντική, ώστε να μην ταυτίζεται η στατιστική σημαντικότητα με ισχυρή πρακτική ή προβλεπτική ικανότητα.

Συνεπώς, η απάντηση στο πρώτο ερευνητικό ερώτημα είναι ότι η ημερήσια μέση θερμοκρασία συνδέεται με τις συγκεντρώσεις των εξεταζόμενων ρύπων, αλλά η σχέση είναι ρυποεξαρτώμενη, χωρικά και εποχικά μεταβαλλόμενη και γενικά περιορισμένη ως προς την ερμηνευτική της ισχύ. Δεν μπορεί να γενικευθεί σε όλους τους ρύπους, τους σταθμούς και τις εποχές ούτε να ερμηνευθεί ως απόδειξη άμεσης αιτιώδους επίδρασης της θερμοκρασίας.

5.2.2 Σχέση ημερήσιων μεταβολών θερμοκρασίας και ατμοσφαιρικών ρύπων

Ως προς το δεύτερο ερευνητικό ερώτημα, διαπιστώθηκε ότι οι μεταβολές της θερμοκρασίας από τη μία ημέρα στην επόμενη συνδέθηκαν σε ορισμένες περιπτώσεις με αντίστοιχες μεταβολές των συγκεντρώσεων των εξεταζόμενων ρύπων. Η ανάλυση των πρώτων διαφορών επέτρεψε την εστίαση στη βραχυχρόνια συνδιακύμανση των μεταβλητών, περιορίζοντας μέρος της επίδρασης της ευρύτερης εποχικής εξέλιξής τους και αναδεικνύοντας περισσότερο τις μεταβολές που εκδηλώνονται σε ημερήσια κλίμακα.

Οι εντονότερες θετικές σχέσεις καταγράφηκαν για το O_3 και τα PM_{10} , ενώ για το NO και το NO_2 οι ισχυρότερες βραχυχρόνιες σχέσεις είχαν αρνητική κατεύθυνση. Η διαφοροποίηση αυτή δείχνει ότι η ίδια ημερήσια μεταβολή της θερμοκρασίας δεν συνοδεύεται από

ομοιόμορφη μεταβολή όλων των ατμοσφαιρικών ρύπων. Αντίθετα, η κατεύθυνση της σχέσης εξαρτάται από τις πηγές, τη χημική συμπεριφορά και τους μηχανισμούς σχηματισμού ή απομάκρυνσης κάθε ρύπου. Το SO₂ εμφάνισε και σε αυτή την προσέγγιση ασθενέστερη και λιγότερο συνεπή σύνδεση με τη θερμοκρασιακή μεταβολή.

Οι σχέσεις διαφοροποιήθηκαν επίσης μεταξύ εποχών και σταθμών. Το γεγονός αυτό υποδηλώνει ότι η βραχυχρόνια συνδιακύμανση δεν καθορίζεται αποκλειστικά από τη θερμοκρασία, αλλά επηρεάζεται από το τοπικό περιβάλλον μέτρησης, τις ημερήσιες μεταβολές των εκπομπών, τις συνθήκες ατμοσφαιρικής ανάμιξης, τη μεταφορά αέριων μαζών και τη φωτοχημική δραστηριότητα. Επομένως, ακόμη και για τον ίδιο ρύπο, η κατεύθυνση και η ένταση της σχέσης δεν παρέμειναν σταθερές σε όλες τις περιπτώσεις.

Παρά τις επιμέρους στατιστικά σημαντικές σχέσεις, δεν προέκυψε καθολικό και σταθερό πρότυπο. Ακόμη και στις περιπτώσεις με τη μεγαλύτερη συσχέτιση, οι τιμές του R² παρέμειναν χαμηλότερες από 0,15. Επομένως, τα απλά γραμμικά μοντέλα περιέγραψαν μικρό μόνο μέρος της παρατηρούμενης ημερήσιας μεταβλητότητας των ρύπων, ενώ το μεγαλύτερο μέρος της διακύμανσης παρέμεινε εκτός της επίδρασης που αποτυπώνεται από τη θερμοκρασιακή μεταβολή. Η χαμηλή ερμηνευτική ικανότητα των μοντέλων δείχνει ότι οι βραχυχρόνιες μεταβολές των συγκεντρώσεων διαμορφώνονται από την ταυτόχρονη δράση πολλών μετεωρολογικών, εκπομπικών και τοπικών παραγόντων.

Η στατιστική σημαντικότητα ορισμένων σχέσεων δεν πρέπει, συνεπώς, να ταυτίζεται με ισχυρή πρακτική ή προβλεπτική ικανότητα. Ένα στατιστικά σημαντικό αποτέλεσμα μπορεί να αποτυπώνει μία συνεπή γραμμική τάση, χωρίς η ημερήσια μεταβολή της θερμοκρασίας να περιγράφει μεγάλο ποσοστό της αντίστοιχης μεταβλητότητας του ρύπου.

Η απάντηση στο δεύτερο ερευνητικό ερώτημα είναι ότι οι ημερήσιες μεταβολές της θερμοκρασίας συνδέθηκαν σε ορισμένες περιπτώσεις με συστηματικές μεταβολές των συγκεντρώσεων, με διαφορετική κατεύθυνση ανάλογα με τον ρύπο, την εποχή και τον σταθμό. Ωστόσο, η θερμοκρασιακή μεταβολή δεν αποτέλεσε επαρκή μεμονωμένο παράγοντα για την ερμηνεία της βραχυχρόνιας εξέλιξης της ατμοσφαιρικής ρύπανσης ούτε επέτρεψε τη διαμόρφωση ενός ενιαίου προτύπου για το σύνολο των εξεταζόμενων περιπτώσεων.

5.2.3 Εποχική διαφοροποίηση των σχέσεων

Ως προς το τρίτο ερευνητικό ερώτημα, τα αποτελέσματα ανέδειξαν ουσιαστική εποχική διαφοροποίηση της σχέσης μεταξύ θερμοκρασίας και ατμοσφαιρικών ρύπων. Οι συσχετίσεις μεταβλήθηκαν τόσο ως προς την ένταση όσο και, σε αρκετές περιπτώσεις, ως προς την κατεύθυνσή τους, γεγονός που δείχνει ότι η εποχή επηρεάζει σημαντικά το πλαίσιο μέσα στο οποίο διαμορφώνονται οι παρατηρούμενες σχέσεις.

Στην ανάλυση των ημερήσιων μεταβολών, οι εντονότερες σχέσεις για το NO, το NO₂ και το O₃ καταγράφηκαν κατά τον χειμώνα, ενώ για τα PM₁₀ και το SO₂ κατά το καλοκαίρι. Δεν προέκυψε, επομένως, μία κοινή εποχή κατά την οποία η μεταβολή της θερμοκρασίας να συνδέεται εντονότερα με όλους τους εξεταζόμενους ρύπους. Η εικόνα αυτή επιβεβαιώνει ότι η εποχική συμπεριφορά εξαρτάται από τις ιδιαίτερες πηγές, τους μηχανισμούς σχηματισμού και τις ατμοσφαιρικές διεργασίες που επηρεάζουν κάθε ατμοσφαιρικό συστατικό.

Οι χειμερινές σχέσεις του NO και του NO₂ μπορούν να ερμηνευθούν σε συνάρτηση με τη συχνότερη εμφάνιση σταθερότερων ατμοσφαιρικών συνθηκών, το χαμηλότερο ύψος ανάμιξης και τις αυξημένες εκπομπές από καύσεις και θέρμανση. Αντίθετα, οι θερινές σχέσεις των PM₁₀ μπορεί να συνδέονται με την αυξημένη ξηρότητα, τη μειωμένη βροχόπτωση και την εντονότερη επαναιώρηση σκόνης. Για το SO₂, η θερινή διαφοροποίηση είναι πιθανό να αντανakλά περισσότερο την επίδραση τοπικών πηγών και ειδικών συνθηκών μεταφοράς παρά έναν άμεσο θερμοκρασιακό μηχανισμό.

Η χειμερινή εμφάνιση της ισχυρότερης βραχυχρόνιας σχέσης για το O₃ δεν σημαίνει ότι οι υψηλότερες απόλυτες συγκεντρώσεις του ρύπου εμφανίστηκαν τον χειμώνα. Το εύρημα αφορά αποκλειστικά τη συνδιακύμανση των ημερήσιων μεταβολών εντός της συγκεκριμένης εποχής και δεν αναιρεί τον ευρύτερο ανοιξιότικο και θερινό κύκλο του O₃. Η διάκριση αυτή είναι σημαντική, ώστε να μην συγχέεται η εποχή κατά την οποία καταγράφεται η εντονότερη βραχυχρόνια σχέση με την εποχή κατά την οποία εμφανίζονται οι υψηλότερες απόλυτες συγκεντρώσεις.

Η εποχική διαφοροποίηση παρατηρήθηκε και στην ανάλυση των ημερήσιων μέσων τιμών, όπου οι σχέσεις συχνά αντανakλούσαν ευρύτερα εποχικά πρότυπα εκπομπών, φωτοχημικής δραστηριότητας και διασποράς. Αυτό δείχνει ότι η εποχή δεν λειτουργεί μόνο ως χρονική κατηγορία, αλλά ως πλαίσιο μέσα στο οποίο μεταβάλλονται ταυτόχρονα πολλοί παράγοντες που επηρεάζουν τις συγκεντρώσεις των ρύπων.

Η απάντηση στο τρίτο ερευνητικό ερώτημα είναι ότι η σχέση θερμοκρασίας και ρύπων παρουσίασε σαφή εποχική διαφοροποίηση. Η διαπίστωση αυτή είναι περιγραφική, καθώς δεν εφαρμόστηκε ειδικός στατιστικός έλεγχος για την άμεση σύγκριση των συντελεστών μεταξύ των εποχών. Ωστόσο, οι μεταβολές στην κατεύθυνση, στην ένταση και στη συνέπεια των σχέσεων είναι αρκετές ώστε να δείχνουν ότι η εποχή αποτελεί κρίσιμο πλαίσιο ερμηνείας και ότι τα αποτελέσματα δεν μπορούν να αξιολογηθούν ανεξάρτητα από τις εποχικές συνθήκες.

5.2.4 Χωρική διαφοροποίηση των σχέσεων και χαρακτήρας των σταθμών

Ως προς το τέταρτο ερευνητικό ερώτημα, παρατηρήθηκε σαφής χωρική διαφοροποίηση της σχέσης μεταξύ θερμοκρασίας και ατμοσφαιρικών ρύπων. Οι συντελεστές συσχέτισης, οι κλίσεις των γραμμικών μοντέλων και η στατιστική σημαντικότητα των σχέσεων διέφεραν μεταξύ των σταθμών, γεγονός που δείχνει ότι τα καταγραφόμενα πρότυπα συνδέονται και με τα ιδιαίτερα χαρακτηριστικά του τοπικού περιβάλλοντος μέτρησης.

Η Λυκόβρυση ήταν ο σταθμός στον οποίο καταγράφηκαν οι μεγαλύτερες απόλυτες τιμές συσχέτισης για τέσσερις από τους πέντε εξεταζόμενους ρύπους στην ανάλυση των ημερήσιων μεταβολών. Η συχνή εμφάνισή της δεν σημαίνει ότι οι σχέσεις ήταν συστηματικά ισχυρότερες σε όλες τις εποχές και για όλους τους ρύπους. Δείχνει, όμως, ότι στο συγκεκριμένο σύνολο δεδομένων οι εντονότερες βραχυχρόνιες συνδιακυμάνσεις εμφανίστηκαν συχνότερα στον συγκεκριμένο σταθμό. Η εικόνα αυτή μπορεί να συνδέεται με τον προαστιακό χαρακτήρα της περιοχής, τη συνδυασμένη επίδραση τοπικών και μεταφερόμενων εκπομπών και τις ιδιαίτερες συνθήκες ατμοσφαιρικής κυκλοφορίας.

Οι κεντρικοί και κυκλοφοριακά επιβαρυνόμενοι σταθμοί επηρεάζονται περισσότερο από άμεσες εκπομπές οχημάτων, από τη χρονική μεταβολή της κυκλοφορίας και από τις συνθήκες αερισμού του πυκνοδομημένου αστικού ιστού. Στις περιοχές αυτές, η ένταση των τοπικών πηγών μπορεί να καλύπτει ή να εξασθενεί τη στατιστική σχέση με τη θερμοκρασία. Αντίθετα, στους προαστιακούς και περιαστικούς σταθμούς μπορεί να αποκτούν μεγαλύτερη σχετική σημασία η περιφερειακή μεταφορά, η φωτοχημική εξέλιξη των αέριων μαζών, το υψόμετρο και η απόσταση από άμεσες πηγές εκπομπής.

Η Ελευσίνα διαφοροποιείται λόγω της βιομηχανικής και λιμενικής φυσιογνωμίας της. Οι συγκεντρώσεις των ρύπων στην περιοχή είναι πιθανό να επηρεάζονται από ειδικές και χωρικά εντοπισμένες πηγές, των οποίων η χρονική μεταβολή δεν ακολουθεί αναγκαστικά τις μεταβολές της θερμοκρασίας. Παράλληλα, η γειτνίαση με τη θάλασσα και οι τοπικές ανεμολογικές συνθήκες μπορούν να επηρεάζουν σημαντικά τη μεταφορά και τη διασπορά των ρύπων.

Οι Θρακομακεδόνες αντιπροσωπεύουν περισσότερο περιαστικό περιβάλλον, στο οποίο η μικρότερη άμεση επίδραση της οδικής κυκλοφορίας, το αυξημένο υψόμετρο και η μεταφορά αέριων μαζών μπορεί να αποκτούν μεγαλύτερη σημασία. Αντίστοιχα, η Πατησίων και η Αριστοτέλους αποτυπώνουν διαφορετικές όψεις του κεντρικού αστικού περιβάλλοντος, καθώς η πρώτη χαρακτηρίζεται από εντονότερη κυκλοφοριακή επιβάρυνση, ενώ η δεύτερη αντιπροσωπεύει περισσότερο αστικό υπόβαθρο.

Οι χωρικές διαφοροποιήσεις δεν πρέπει, ωστόσο, να αποδίδονται αποκλειστικά στον λειτουργικό χαρακτηρισμό κάθε σταθμού. Οι τοπικές εκπομπές, η γεωμορφολογία, η πυκνότητα δόμησης, η ταχύτητα και η διεύθυνση του ανέμου, η φωτοχημική δραστηριότητα και η μεταφορά ρύπων μπορούν να μεταβάλλουν ουσιαστικά τη συμπεριφορά των συγκεντρώσεων ακόμη και μεταξύ σταθμών της ίδιας ευρύτερης κατηγορίας.

Οι ερμηνείες αυτές παραμένουν ενδεικτικές, καθώς οι τοπικές εκπομπές, η διεύθυνση και η ταχύτητα του ανέμου, η μεταφορά ρύπων και οι υπόλοιπες μετεωρολογικές παράμετροι δεν εξετάστηκαν άμεσα στα εφαρμοζόμενα μοντέλα. Επιπλέον, η μη πλήρης συνεγκατάσταση των σταθμών ατμοσφαιρικής ρύπανσης και των μετεωρολογικών σταθμών εισάγει πρόσθετη αβεβαιότητα στη χωρική ερμηνεία των αποτελεσμάτων.

Η απάντηση στο τέταρτο ερευνητικό ερώτημα είναι ότι η σχέση θερμοκρασίας και ατμοσφαιρικής ρύπανσης διαφοροποιήθηκε ανάλογα με τη θέση, τον λειτουργικό χαρακτήρα του σταθμού και τις ιδιαίτερες τοπικές συνθήκες. Το λεκανοπέδιο της Αθήνας δεν πρέπει, επομένως, να αντιμετωπίζεται ως απολύτως ομοιογενές ατμοσφαιρικό περιβάλλον, αλλά ως σύνθετος χώρος με διαφορετικά πρότυπα εκπομπών, μεταφοράς, χημικού μετασχηματισμού και διασποράς.

5.3 Σύνθεση των βασικών συμπερασμάτων ανά ατμοσφαιρικό ρύπο

Η εξέταση των αποτελεσμάτων ανά ρύπο ανέδειξε ότι η θερμοκρασία δεν συνδέεται με ενιαίο τρόπο με το σύνολο των ατμοσφαιρικών ρύπων που αναλύθηκαν. Κάθε ρύπος παρουσίασε διαφορετικό πρότυπο σχέσης, το οποίο αντανακλά τη φυσικοχημική του συμπεριφορά, τις πηγές προέλευσης, τους μηχανισμούς σχηματισμού και απομάκρυνσης, καθώς και την επίδραση των τοπικών εκπομπών, της ατμοσφαιρικής διασποράς και της εποχικότητας.

Η παράλληλη αξιολόγηση των ημερήσιων μέσων τιμών και των μεταβολών μεταξύ διαδοχικών ημερών επέτρεψε τη διάκριση μεταξύ των ευρύτερων εποχικών προτύπων και της βραχυχρόνιας συνδιακύμανσης της θερμοκρασίας με τις συγκεντρώσεις των ρύπων. Οι σχέσεις που καταγράφηκαν στις ημερήσιες μέσες τιμές δεν διατηρήθηκαν πάντοτε με την ίδια ένταση ή κατεύθυνση στην ανάλυση των πρώτων διαφορών. Το εύρημα αυτό δείχνει ότι μέρος των αρχικών σχέσεων πιθανότατα συνδέεται με την κοινή εποχική εξέλιξη της θερμοκρασίας και των συγκεντρώσεων και όχι αποκλειστικά με τη βραχυχρόνια μεταβολή τους.

5.3.1 Μονοξείδιο του αζώτου (NO)

Το NO παρουσίασε γενικά ασθενείς και συχνότερα αρνητικές σχέσεις με τη θερμοκρασία, με διαφοροποιήσεις μεταξύ σταθμών και εποχών. Η συμπεριφορά αυτή είναι συμβατή με τον χαρακτήρα του ως πρωτογενούς ρύπου, ο οποίος συνδέεται κυρίως με την οδική κυκλοφορία και άλλες διεργασίες καύσης και χαρακτηρίζεται από σχετικά μικρό χρόνο παραμονής στην ατμόσφαιρα.

Στις ημερήσιες μέσες τιμές, οι αρνητικές σχέσεις μπορεί να συνδέονται με ευνοϊκότερες συνθήκες ατμοσφαιρικής ανάμιξης κατά τις θερμότερες ημέρες, με εποχικές μεταβολές στην ένταση των εκπομπών και με την ταχύτερη χημική μετατροπή του NO σε άλλες ενώσεις του αζώτου. Παράλληλα, οι χαμηλότερες θερμοκρασίες μπορεί να συνυπάρχουν με δυσμενέστερες συνθήκες διασποράς και αυξημένες εκπομπές από δραστηριότητες καύσης, χωρίς όμως η θερμοκρασία να αποτελεί τον μοναδικό παράγοντα διαμόρφωσης των συγκεντρώσεων.

Στην ανάλυση των μεταβολών μεταξύ διαδοχικών ημερών, οι αρνητικές σχέσεις ήταν περισσότερο εμφανείς κατά τον χειμώνα και σε ορισμένους σταθμούς, χωρίς να παρουσιάζουν σταθερή ένταση ή στατιστική συνέπεια σε όλες τις περιπτώσεις. Το εύρημα αυτό δείχνει ότι η βραχυχρόνια συνδιακύμανση του NO με τη θερμοκρασία εξαρτάται σημαντικά από τις επικρατούσες συνθήκες εκπομπών και ατμοσφαιρικής κυκλοφορίας.

Η συμπεριφορά του NO διαφοροποιήθηκε επίσης ανάλογα με τον χαρακτήρα του σταθμού και την εγγύτητά του σε άμεσες πηγές. Σε κυκλοφοριακά επιβαρυνμένες περιοχές, οι βραχυχρόνιες διακυμάνσεις της κυκλοφορίας και των εκπομπών μπορεί να υπερισχύουν της επίδρασης των μετεωρολογικών μεταβολών. Αντίθετα, σε προαστιακές και περιαστικές θέσεις μπορεί να αποκτούν μεγαλύτερη σχετική σημασία η μεταφορά, η αραίωση και η χημική εξέλιξη των αέριων μαζών.

Συνολικά, το NO δεν παρουσίασε σταθερή και ομοιόμορφη σχέση με τη θερμοκρασία. Η μεταβλητότητά του φαίνεται να διαμορφώνεται από τη σύνθετη αλληλεπίδραση των τοπικών εκπομπών, της ατμοσφαιρικής διασποράς και της χημικής μετατροπής, ενώ η θερμοκρασία λειτουργεί περισσότερο ως μέρος ενός ευρύτερου μετεωρολογικού πλαισίου παρά ως ανεξάρτητος και άμεσα καθοριστικός παράγοντας.

5.3.2 Διοξείδιο του αζώτου (NO₂)

Το NO₂ παρουσίασε επίσης συχνότερα αρνητικές σχέσεις με τη θερμοκρασία, αλλά η συμπεριφορά του ήταν περισσότερο σύνθετη από εκείνη του NO. Το πρότυπο αυτό είναι συμβατό με τη διπλή προέλευσή του, καθώς εκπέμπεται άμεσα από πηγές καύσης και παράγεται παράλληλα μέσω της οξειδωσης του NO στην ατμόσφαιρα.

Στις ημερήσιες μέσες τιμές, οι αρνητικές σχέσεις μπορεί να αντανακλούν την αποτελεσματικότερη ατμοσφαιρική ανάμιξη κατά τις θερμότερες ημέρες, τις εποχικές διαφοροποιήσεις των εκπομπών και τις μεταβολές στη χημική ισορροπία του συστήματος NO–NO₂–O₃. Παράλληλα, κατά τις ψυχρότερες περιόδους μπορεί να συνυπάρχουν αυξημένες εκπομπές από καύσεις και δυσμενέστερες συνθήκες διασποράς, οι οποίες ευνοούν τη συσσώρευση του ρύπου κοντά στην επιφάνεια.

Στην ανάλυση των μεταβολών μεταξύ διαδοχικών ημερών, οι εντονότερες αρνητικές σχέσεις καταγράφηκαν κυρίως κατά τον χειμώνα, χωρίς όμως να εμφανίζονται με την ίδια

ένταση ή συνέπεια σε όλες τις θέσεις. Η διαφοροποίηση αυτή δείχνει ότι η βραχυχρόνια συνδιακύμανση του NO_2 με τη θερμοκρασία εξαρτάται από τον συνδυασμό των τοπικών εκπομπών, της ατμοσφαιρικής κυκλοφορίας και των φωτοχημικών διεργασιών.

Οι διαφορές μεταξύ των σταθμών επιβεβαιώνουν ότι η συμπεριφορά του NO_2 επηρεάζεται σημαντικά από το τοπικό περιβάλλον εκπομπών και τον χαρακτήρα κάθε θέσης μέτρησης. Σε περιοχές αυξημένης κυκλοφορίας, οι άμεσες εκπομπές και η ταχεία μετατροπή του NO μπορεί να καλύπτουν μέρος της σχέσης με τη θερμοκρασία. Αντίθετα, σε προαστιακές και περιαστικές θέσεις η μεταφορά, η αραίωση και η φωτοχημική εξέλιξη των αέριων μαζών ενδέχεται να αποκτούν μεγαλύτερη σχετική σημασία.

Συνολικά, το NO_2 παρουσίασε μετρήσιμες αλλά κατά κανόνα ασθενείς, εποχικά μεταβαλλόμενες και χωρικά διαφοροποιημένες σχέσεις με τη θερμοκρασία. Η συμπεριφορά του διαμορφώνεται τόσο από τις άμεσες και έμμεσες πηγές προέλευσης όσο και από τη χημική αλληλεπίδρασή του με το NO και το O_3 , γεγονός που περιορίζει τη δυνατότητα ερμηνείας των μεταβολών του αποκλειστικά μέσω της θερμοκρασίας.

5.3.3 Τροποσφαιρικό όζον (O_3)

Το O_3 εμφάνισε τις σαφέστερες και πιο συνεπείς θετικές σχέσεις με τη θερμοκρασία μεταξύ των εξεταζόμενων αέριων ρύπων. Το πρότυπο αυτό συμφωνεί με τον δευτερογενή φωτοχημικό χαρακτήρα του, καθώς ο σχηματισμός του ευνοείται από την έντονη ηλιακή ακτινοβολία, τη διαθεσιμότητα πρόδρομων ενώσεων και τις θερμές, φωτοχημικά ενεργές συνθήκες.

Στις ημερήσιες μέσες τιμές, οι θετικές σχέσεις αντανakλούν σε σημαντικό βαθμό την παράλληλη εποχική εξέλιξη της θερμοκρασίας και των συγκεντρώσεων O_3 . Κατά τις θερμότερες περιόδους, η αυξημένη φωτοχημική δραστηριότητα μπορεί να συμβάλλει στην ενίσχυση των συγκεντρώσεων, χωρίς όμως η θερμοκρασία να δρα ανεξάρτητα από την ηλιακή ακτινοβολία, τη νέφωση, τον άνεμο και τη διαθεσιμότητα πρόδρομων ουσιών.

Στην ανάλυση των μεταβολών μεταξύ διαδοχικών ημερών, οι θετικές σχέσεις διατηρήθηκαν σε ορισμένες περιπτώσεις. Το εύρημα αυτό υποδηλώνει ότι η βραχυχρόνια αύξηση της θερμοκρασίας μπορεί να συνυπάρχει με αντίστοιχες μεταβολές στις φωτοχημικές συνθήκες και, κατά συνέπεια, με αύξηση των επιπέδων O_3 .

Η εντονότερη βραχυχρόνια σχέση καταγράφηκε κατά τον χειμώνα. Αυτό δεν σημαίνει ότι οι υψηλότερες απόλυτες συγκεντρώσεις εμφανίστηκαν στη συγκεκριμένη εποχή, αλλά ότι οι ημερήσιες μεταβολές της θερμοκρασίας και του O_3 παρουσίασαν στενότερη συνδιακύμανση. Η διάκριση μεταξύ του επιπέδου των συγκεντρώσεων και της μεταβολής τους είναι κρίσιμη, ώστε να αποφεύγονται εσφαλμένες εποχικές ερμηνείες.

Παράλληλα, η σχέση διαφοροποιήθηκε ανάλογα με τον χαρακτήρα των σταθμών. Σε κεντρικές και κυκλοφοριακά επιβαρυνμένες θέσεις, οι αυξημένες συγκεντρώσεις NO μπορεί να οδηγούν σε εντονότερη κατανάλωση του O_3 . Αντίθετα, σε προαστιακές και περιφερειακές περιοχές, η μικρότερη άμεση επίδραση του NO και η μεταφορά φωτοχημικά ώριμων αέριων μαζών είναι δυνατόν να ευνοούν υψηλότερα επίπεδα του ρύπου.

Η εικόνα που προκύπτει αναδεικνύει το O_3 ως τον αέριο ρύπο με την πιο καθαρή θετική σύνδεση με τη θερμοκρασία. Ωστόσο, η περιορισμένη ερμηνευτική ισχύς ακόμη και των ισχυρότερων σχέσεων δείχνει ότι η μεταβλητότητά του καθορίζεται από τη συνδυασμένη δράση πολλών φωτοχημικών και μετεωρολογικών παραγόντων.

5.3.4 Αιωρούμενα σωματίδια (PM_{10})

Τα PM_{10} παρουσίασαν συχνά θετικές σχέσεις με τη θερμοκρασία, ιδιαίτερα κατά τη θερινή περίοδο. Σε αντίθεση, όμως, με το σαφέστερο φωτοχημικό πρότυπο του O_3 , η συμπεριφορά τους ήταν περισσότερο ετερογενής, γεγονός που συνδέεται με τη σύνθετη προέλευση, τη μεταβλητή χημική σύσταση και το διαφορετικό μέγεθος των σωματιδίων που περιλαμβάνονται σε αυτή την κατηγορία.

Οι συγκεντρώσεις των PM_{10} διαμορφώνονται από ένα ευρύ σύνολο πηγών και διεργασιών, όπως οι κυκλοφοριακές και βιομηχανικές εκπομπές, η φθορά οδοστρώματος, φρένων και ελαστικών, η επαναιώρηση εδαφικής και οδικής σκόνης, τα θαλάσσια αερολύματα, η μεταφορά φυσικής σκόνης και ο σχηματισμός δευτερογενών σωματιδίων. Η ετερογένεια αυτή εξηγεί γιατί η σχέση τους με τη θερμοκρασία δεν εμφανίζεται με ενιαίο τρόπο και δεν μπορεί να αποδοθεί σε έναν μόνο μηχανισμό.

Στις ημερήσιες μέσες τιμές, οι θετικές σχέσεις ενδέχεται να συνδέονται με ξηρότερες ατμοσφαιρικές συνθήκες, περιορισμένη υγρή απομάκρυνση και αυξημένη επαναιώρηση σκόνης από γυμνές επιφάνειες και το οδικό δίκτυο. Παράλληλα, οι υψηλότερες

θερμοκρασίες μπορεί να συνοδεύονται από μεγαλύτερη διάρκεια ξηρών περιόδων, ευνοώντας τη συσσώρευση και την εκ νέου αιώρηση σωματιδιακού υλικού.

Στην ανάλυση των μεταβολών μεταξύ διαδοχικών ημερών, το θετικό πρότυπο ήταν περισσότερο εμφανές κατά το καλοκαίρι. Η παρατήρηση αυτή υποδηλώνει ότι οι ημερήσιες αυξήσεις της θερμοκρασίας μπορεί να συνυπάρχουν με μεταβολές στην ξηρότητα της επιφάνειας, στην ένταση της επαναιώρησης και στις συνθήκες ατμοσφαιρικής μεταφοράς. Δεν τεκμηριώνει, ωστόσο, άμεση επίδραση της θερμοκρασίας στις συγκεντρώσεις των PM_{10} , καθώς οι ίδιες μεταβολές είναι δυνατόν να συνδέονται με ταυτόχρονες αλλαγές στον άνεμο, στη βροχόπτωση και στις τοπικές εκπομπές.

Η χωρική διαφοροποίηση των αποτελεσμάτων αναδεικνύει επίσης τη σημασία της χρήσης γης και του χαρακτήρα κάθε σταθμού. Σε βιομηχανικά επηρεασμένες περιοχές μπορεί να αποκτούν μεγαλύτερη βαρύτητα οι εκπομπές εγκαταστάσεων, οι μεταφορικές δραστηριότητες και η κίνηση βαρέων οχημάτων. Στις πυκνοδομημένες αστικές περιοχές, αντίθετα, η οδική κυκλοφορία, η φθορά των επιφανειών και η επαναιώρηση της ήδη εναποτεθειμένης σκόνης ενδέχεται να έχουν εντονότερη συμβολή.

Η ερμηνεία των αποτελεσμάτων για τα PM_{10} απαιτεί, επομένως, ιδιαίτερη προσοχή. Παρότι διαμορφώθηκε ένα σχετικά σαφές θετικό πρότυπο, κυρίως κατά τη θερινή περίοδο, η περιορισμένη ισχύς των σχέσεων δείχνει ότι η θερμοκρασία αποτελεί μόνο έναν από τους παράγοντες που συνδιαμορφώνουν τη μεταβλητότητά τους. Η βροχόπτωση, η ταχύτητα και η διεύθυνση του ανέμου, η διάρκεια της ξηρής περιόδου και τα επεισόδια μεταφοράς σκόνης παραμένουν κρίσιμοι παράγοντες για την πληρέστερη κατανόηση της συμπεριφοράς τους.

5.3.5 Διοξείδιο του θείου (SO_2)

Το SO_2 παρουσίασε τις ασθενέστερες και λιγότερο συνεπείς σχέσεις με τη θερμοκρασία μεταξύ των εξεταζόμενων ρύπων. Η εικόνα αυτή είναι συμβατή με τον χαρακτήρα του ως κυρίως πρωτογενούς ρύπου, οι συγκεντρώσεις του οποίου επηρεάζονται άμεσα από την ένταση και τη χωρική κατανομή συγκεκριμένων πηγών εκπομπής. Σε αυτές περιλαμβάνονται η καύση θειούχων καυσίμων, οι βιομηχανικές δραστηριότητες, οι λιμενικές και ναυτιλιακές εκπομπές, καθώς και άλλες τοπικές διεργασίες καύσης.

Στην ανάλυση των ημερήσιων μέσων τιμών δεν διαμορφώθηκε σταθερό πρότυπο θετικών ή αρνητικών σχέσεων. Η κατεύθυνση και η ένταση των συσχετίσεων διαφοροποιήθηκαν ανά σταθμό και εποχή, γεγονός που υποδηλώνει ότι οι τοπικές πηγές, η απόσταση από τα σημεία εκπομπής και οι εκάστοτε συνθήκες μεταφοράς και αραίωσης έχουν μεγαλύτερη σχετική σημασία από τη θερμοκρασία. Ιδιαίτερα σε περιοχές που επηρεάζονται από βιομηχανικές ή λιμενικές δραστηριότητες, οι διακυμάνσεις των εκπομπών μπορεί να καθορίζουν σε σημαντικό βαθμό τη χρονική εξέλιξη των συγκεντρώσεων.

Ανάλογη εικόνα προέκυψε και από την ανάλυση των μεταβολών μεταξύ διαδοχικών ημερών. Ακόμη και η εντονότερη σχέση παρέμεινε ασθενής και εμφάνισε πολύ χαμηλή ερμηνευτική ικανότητα, γεγονός που δείχνει ότι οι ημερήσιες μεταβολές της θερμοκρασίας συνδέονται μόνο περιορισμένα με τη βραχυχρόνια εξέλιξη του SO₂. Η απουσία συνεπούς προτύπου ενισχύει την εκτίμηση ότι η συμπεριφορά του ρύπου δεν ακολουθεί άμεσα τις θερμοκρασιακές μεταβολές.

Η εμφάνιση της σχετικά εντονότερης σχέσης κατά τη θερινή περίοδο δεν τεκμηριώνει άμεσο μηχανισμό αύξησης των συγκεντρώσεων του SO₂ λόγω υψηλότερης θερμοκρασίας. Πιθανότερα αντανακλά τη χρονική συνύπαρξη των θερμοκρασιακών μεταβολών με ειδικές συνθήκες ατμοσφαιρικής κυκλοφορίας, αλλαγές στη διεύθυνση και στην ταχύτητα του ανέμου ή διαφοροποιήσεις στην ένταση λειτουργίας των τοπικών πηγών. Επομένως, η συγκεκριμένη σχέση πρέπει να ερμηνεύεται ως ένδειξη συνδιακύμανσης και όχι ως απόδειξη άμεσης επίδρασης.

Ιδιαίτερη σημασία έχει και η χωρική θέση των σταθμών. Σε σταθμούς που βρίσκονται πλησιέστερα σε βιομηχανικές, λιμενικές ή άλλες σημειακές πηγές, οι συγκεντρώσεις είναι πιθανό να επηρεάζονται περισσότερο από τη διεύθυνση μεταφοράς των αέριων μαζών και από τη χρονική μεταβλητότητα των εκπομπών. Σε μεγαλύτερες αποστάσεις από τις πηγές, η αραίωση, η οξείδωση του SO₂ και η μετατροπή του σε θειικά σωματίδια μπορεί να αποκτούν μεγαλύτερη σχετική σημασία.

Η συνολική εικόνα του SO₂ διαφοροποιείται, επομένως, από εκείνη των ρύπων που παρουσίασαν σαφέστερη θερμοκρασιακή εξάρτηση. Η μεταβλητότητά του φαίνεται να καθορίζεται κυρίως από ειδικές τοπικές πηγές, τις συνθήκες λειτουργίας τους και τη μεταφορά των εκπομπών, ενώ η θερμοκρασία διαδραματίζει περισσότερο έμμεσο και δευτερεύοντα ρόλο.

5.4 Επιστημονική συμβολή και πρακτική σημασία

Η επιστημονική συμβολή της παρούσας διπλωματικής εργασίας έγκειται στη συστηματική διερεύνηση της σχέσης μεταξύ θερμοκρασίας και ατμοσφαιρικής ρύπανσης σε διαφορετικά χωρικά και εποχικά περιβάλλοντα του λεκανοπεδίου της Αθήνας. Η αξιοποίηση ημερήσιων δεδομένων για την περίοδο 2016–2024 επέτρεψε την εξέταση ενός εκτεταμένου χρονικού διαστήματος και την ανάδειξη διαφοροποιήσεων που θα ήταν δυσκολότερο να αποτυπωθούν σε βραχύτερες χρονοσειρές.

Ιδιαίτερη αξία παρουσιάζει η παράλληλη μελέτη πέντε ρύπων με διαφορετική προέλευση και φυσικοχημική συμπεριφορά. Η συγκριτική εξέταση του NO, του NO₂, του O₃, των PM₁₀ και του SO₂ έδειξε ότι η θερμοκρασία δεν συνδέεται με ενιαίο τρόπο με όλους τους ρύπους. Κάθε ρύπος εμφάνισε διαφορετικό πρότυπο, συμβατό με τις πηγές εκπομπής, τους μηχανισμούς σχηματισμού και απομάκρυνσης, καθώς και με τις τοπικές και εποχικές συνθήκες.

Σημαντική είναι επίσης η χωρική διάσταση της ανάλυσης. Η επιλογή σταθμών με διαφορετικά λειτουργικά χαρακτηριστικά κατέστησε δυνατή τη σύγκριση κυκλοφοριακών, αστικών, προαστιακών, περιαστικών και βιομηχανικά επηρεασμένων περιοχών. Τα αποτελέσματα ανέδειξαν ότι το λεκανοπέδιο της Αθήνας δεν παρουσιάζει ομοιόμορφη ατμοσφαιρική συμπεριφορά, αλλά διαφοροποιείται ανάλογα με το τοπικό περιβάλλον εκπομπών, τη μορφολογία, τις συνθήκες διασποράς και τη μεταφορά αέριων μαζών.

Κεντρική μεθοδολογική συνεισφορά της εργασίας αποτελεί η παράλληλη εφαρμογή δύο συμπληρωματικών προσεγγίσεων. Η ανάλυση των ημερήσιων μέσων τιμών αποτύπωσε τη γενικότερη συνδιακύμανση της θερμοκρασίας και των συγκεντρώσεων, στην οποία ενσωματώνεται και η εποχική μεταβλητότητα. Αντίθετα, η ανάλυση των μεταβολών μεταξύ πραγματικά διαδοχικών ημερών επέτρεψε πιο στοχευμένη εξέταση της βραχυχρόνιας συν-μεταβολής. Η σύγκριση των δύο προσεγγίσεων συνέβαλε στη διάκριση μεταξύ ευρύτερης εποχικής διακύμανσης και ημερήσιας δυναμικής.

Η έρευνα ανέδειξε επίσης την ανάγκη συνδυασμένης αξιολόγησης της στατιστικής σημαντικότητας και του μεγέθους της σχέσης. Παρότι αρκετές συσχετίσεις παρουσίασαν $p < 0,05$, οι τιμές των r και R^2 παρέμειναν κατά κανόνα χαμηλές. Επομένως, μια στατιστικά σημαντική σχέση δεν είναι αναγκαστικά ισχυρή από περιβαλλοντική ή ερμηνευτική άποψη. Η διάκριση αυτή περιορίζει τον κίνδυνο υπερερμηνείας και ενισχύει την αξιοπιστία των συμπερασμάτων.

Σε πρακτικό επίπεδο, τα αποτελέσματα δείχνουν ότι η θερμοκρασία μπορεί να αξιοποιηθεί ως βοηθητική μεταβλητή στην παρακολούθηση και εκτίμηση της ποιότητας του αέρα, όχι όμως ως αυτόνομος προγνωστικός δείκτης. Η χρησιμότητά της είναι μεγαλύτερη όταν εντάσσεται σε πολυμεταβλητά μοντέλα μαζί με παραμέτρους όπως η ηλιακή ακτινοβολία, ο άνεμος, η σχετική υγρασία, η βροχόπτωση, το ύψος του ατμοσφαιρικού οριακού στρώματος, η κυκλοφοριακή ένταση και οι βιομηχανικές εκπομπές.

Τα ευρήματα μπορούν να αποτελέσουν βάση για τη μελλοντική ανάπτυξη συστημάτων παρακολούθησης, πρόγνωσης ή έγκαιρης προειδοποίησης. Ιδιαίτερα για το O_3 και, υπό συγκεκριμένες τοπικές και εποχικές συνθήκες, για τα PM_{10} , οι θερμοκρασιακές μεταβολές μπορούν να λειτουργήσουν επικουρικά στον εντοπισμό περιόδων αυξημένου κινδύνου επιδείνωσης της ποιότητας του αέρα.

Η χωρική διαφοροποίηση των αποτελεσμάτων έχει σημασία και για τον σχεδιασμό στοχευμένων πολιτικών περιβαλλοντικής διαχείρισης. Στις κυκλοφοριακά επιβαρυνμένες ζώνες απαιτείται μεγαλύτερη έμφαση στον περιορισμό των εκπομπών από οχήματα, ενώ στις βιομηχανικές και λιμενικές περιοχές αποκτά ιδιαίτερη σημασία η παρακολούθηση ειδικών σημειακών πηγών. Στις προαστιακές και περιαστικές περιοχές πρέπει να λαμβάνονται υπόψη η περιφερειακή μεταφορά και οι φωτοχημικοί μετασχηματισμοί.

Αντίστοιχη σημασία έχει και η εποχική διαφοροποίηση. Κατά τις θερμές και ηλιόλουστες περιόδους απαιτείται αυξημένη παρακολούθηση του O_3 και, ανάλογα με τις τοπικές συνθήκες, των PM_{10} . Κατά τη χειμερινή περίοδο αποκτούν μεγαλύτερη σημασία οι πρωτογενείς ρύποι, ιδιαίτερα όταν επικρατούν συνθήκες ατμοσφαιρικής σταθερότητας και περιορισμένης διασποράς. Η προσαρμογή της παρακολούθησης και των μέτρων στις εποχικές και χωρικές συνθήκες μπορεί να συμβάλει στην αποτελεσματικότερη προστασία της ποιότητας του αέρα και της δημόσιας υγείας.

Η βασική συνεισφορά της μελέτης έγκειται στην ανάδειξη της θερμοκρασίας ως σημαντικής, αλλά όχι αυτοτελώς επαρκούς, παραμέτρου για την κατανόηση της ποιότητας του αέρα. Η ερμηνεία και η πρόβλεψη της ατμοσφαιρικής ρύπανσης απαιτούν τη συνδυαστική εξέταση μετεωρολογικών, περιβαλλοντικών και ανθρωπογενών παραγόντων, καθώς και την προσαρμογή της ανάλυσης στα ιδιαίτερα χαρακτηριστικά κάθε ρύπου, εποχής και περιοχής.

5.5 Περιορισμοί της έρευνας

Τα ευρήματα της παρούσας εργασίας πρέπει να ερμηνεύονται λαμβάνοντας υπόψη ορισμένους περιορισμούς που επηρεάζουν το εύρος και τη δυνατότητα γενίκευσής τους.

Καταρχάς, η ανάλυση επικεντρώθηκε στη θερμοκρασία ως βασική μετεωρολογική μεταβλητή. Ωστόσο, οι συγκεντρώσεις των ατμοσφαιρικών ρύπων διαμορφώνονται από τη συνδυασμένη επίδραση παραγόντων όπως η ταχύτητα και η διεύθυνση του ανέμου, η σχετική υγρασία, η βροχόπτωση, η ηλιακή ακτινοβολία, το ύψος του ατμοσφαιρικού οριακού στρώματος και η ατμοσφαιρική σταθερότητα. Επομένως, οι παρατηρούμενες σχέσεις δεν μπορούν να αποδοθούν αποκλειστικά στη θερμοκρασία.

Η χρήση ημερήσιων μέσων τιμών περιορίζει επίσης τη δυνατότητα αποτύπωσης ενδοημερήσιων προτύπων. Οι πρωινές και απογευματινές αιχμές των πρωτογενών ρύπων, καθώς και οι υψηλότερες συγκεντρώσεις O_3 κατά τις μεσημβρινές και απογευματινές ώρες, ενδέχεται να εξομαλύνονται σε ημερήσια βάση. Τα αποτελέσματα περιγράφουν, συνεπώς, τη γενικότερη ημερήσια συμπεριφορά και όχι τις ωριαίες διακυμάνσεις.

Η χωρική αντιστοίχιση των σταθμών ατμοσφαιρικής ρύπανσης με τους μετεωρολογικούς σταθμούς αποτελεί πρόσθετη πηγή αβεβαιότητας. Παρότι βασίστηκε στη γεωγραφική εγγύτητα και στα βασικά χωρικά και τοπογραφικά χαρακτηριστικά, οι μετρήσεις της θερμοκρασίας δεν προέρχονταν σε όλες τις περιπτώσεις από το ίδιο σημείο με τις μετρήσεις των ρύπων. Τοπικές μικροκλιματικές διαφοροποιήσεις ενδέχεται, επομένως, να επηρέασαν μέρος των παρατηρούμενων σχέσεων.

Παράλληλα, η διαθεσιμότητα των δεδομένων δεν ήταν απολύτως ομοιόμορφη για όλους τους σταθμούς και τους ρύπους. Τα κενά στις χρονοσειρές και οι διαφορές στο πλήθος των παρατηρήσεων μπορεί να επηρεάζουν τη συγκρισιμότητα ορισμένων αποτελεσμάτων, ιδιαίτερα μεταξύ περιπτώσεων με διαφορετικό μέγεθος δείγματος.

Ένας ακόμη περιορισμός αφορά τη χρήση του συντελεστή συσχέτισης Pearson και της απλής γραμμικής παλινδρόμησης. Οι μέθοδοι αυτές αποτυπώνουν κυρίως γραμμικές σχέσεις και δεν περιγράφουν πλήρως πιθανές μη γραμμικότητες, κατώφλια, χρονικές υστερήσεις ή αλληλεπιδράσεις μεταξύ πολλών παραγόντων. Επιπλέον, καθώς η θερμοκρασία εξετάστηκε ως μοναδική ανεξάρτητη μεταβλητή, δεν ήταν δυνατή η απομόνωση της συμβολής της από άλλους μετεωρολογικούς και ανθρωπογενείς παράγοντες που μεταβάλλονται ταυτόχρονα. Οι ασθενείς γραμμικές σχέσεις δεν

αποκλείουν, συνεπώς, την ύπαρξη πιο σύνθετων μορφών σύνδεσης και δεν πρέπει να ερμηνεύονται ως άμεσες αιτιώδεις επιδράσεις.

Η ανάλυση των διαφορών μεταξύ διαδοχικών ημερών περιόρισε μέρος της ευρύτερης εποχικής συνιστώσας, χωρίς όμως να εξαλείψει την επίδραση παραγόντων που μεταβάλλονται ταυτόχρονα. Μεταβολές στις εκπομπές, στην κυκλοφοριακή δραστηριότητα, στη χρήση θέρμανσης ή ψύξης, στη μεταφορά αέριων μαζών και στις συνοπτικές μετεωρολογικές συνθήκες μπορούν επίσης να επηρεάζουν τις ημερήσιες μεταβολές των συγκεντρώσεων.

Τέλος, τα αποτελέσματα αφορούν συγκεκριμένο χωρικό και χρονικό πλαίσιο, δηλαδή το λεκανοπέδιο της Αθήνας κατά την περίοδο 2016–2024. Η εφαρμογή των συμπερασμάτων σε άλλες πόλεις ή χρονικές περιόδους απαιτεί προσοχή, καθώς οι πηγές εκπομπής, η γεωμορφολογία, το κλίμα και τα πρότυπα αστικής ανάπτυξης μπορεί να διαφέρουν σημαντικά.

Οι περιορισμοί αυτοί δεν αναιρούν την αξία της έρευνας, αλλά οριοθετούν το πλαίσιο ερμηνείας των αποτελεσμάτων. Η εργασία αποτυπώνει στατιστικές συνδέσεις υπό συγκεκριμένες χωρικές, χρονικές και μεθοδολογικές συνθήκες και αναδεικνύει την ανάγκη για μελλοντικές αναλύσεις με περισσότερες μετεωρολογικές μεταβλητές, υψηλότερη χρονική ανάλυση και πιο σύνθετες στατιστικές προσεγγίσεις.

5.6 Προτάσεις για μελλοντική έρευνα

Η περαιτέρω διερεύνηση της σχέσης μεταξύ θερμοκρασίας και ποιότητας του αέρα θα μπορούσε να βασιστεί σε πολυμεταβλητές προσεγγίσεις, στις οποίες η θερμοκρασία θα εξετάζεται ταυτόχρονα με την ταχύτητα και τη διεύθυνση του ανέμου, τη σχετική υγρασία, τη βροχόπτωση, την ηλιακή ακτινοβολία, την ατμοσφαιρική πίεση και το ύψος του ατμοσφαιρικού οριακού στρώματος. Η ενσωμάτωση των μεταβλητών αυτών θα επέτρεπε ακριβέστερη εκτίμηση της σχέσης της θερμοκρασίας με τις συγκεντρώσεις των ρύπων, μετά από προσαρμογή για τις υπόλοιπες μετεωρολογικές συνθήκες.

Ιδιαίτερο ενδιαφέρον παρουσιάζει η εφαρμογή πολλαπλής γραμμικής παλινδρόμησης, γενικευμένων προσθετικών μοντέλων και άλλων μη γραμμικών μεθόδων. Οι προσεγγίσεις

αυτές μπορούν να αποτυπώσουν καμπύλες σχέσεις, θερμοκρασιακά κατώφλια και αλληλεπιδράσεις που δεν περιγράφονται επαρκώς από έναν απλό συντελεστή συσχέτισης. Συμπληρωματικά, μέθοδοι μηχανικής μάθησης θα μπορούσαν να αξιοποιηθούν για την πρόβλεψη περιόδων αυξημένης ρύπανσης, υπό την προϋπόθεση εξωτερικής επικύρωσης και ερμηνείας των μοντέλων.

Σημαντική κατεύθυνση αποτελεί και η εξέταση της χρονικής εξάρτησης των δεδομένων. Η εφαρμογή μοντέλων χρονοσειρών και κατανεμημένων μοντέλων υστέρησης θα μπορούσε να διερευνήσει κατά πόσο οι θερμοκρασιακές μεταβολές συνδέονται με τις συγκεντρώσεις όχι μόνο την ίδια ημέρα, αλλά και με καθυστέρηση μίας ή περισσότερων ημερών. Με τον τρόπο αυτό θα μπορούσαν να εντοπιστούν καθυστερημένες ή σωρευτικές σχέσεις, ιδιαίτερα για το O_3 και τα PM_{10} .

Χρήσιμη θα ήταν επίσης η ανάλυση ωριαίων δεδομένων. Η υψηλότερη χρονική ανάλυση θα μπορούσε να αναδείξει τις πρωινές και απογευματινές αιχμές, τις επιδράσεις της κυκλοφορίας, τη μεσημβρινή φωτοχημική δραστηριότητα και την ημερήσια εξέλιξη του ατμοσφαιρικού οριακού στρώματος. Η προσέγγιση αυτή θα επέτρεπε πληρέστερη κατανόηση του κύκλου $NO-NO_2-O_3$ και της σύνδεσής του με τη θερμοκρασία και την ηλιακή ακτινοβολία.

Μία ακόμη κατεύθυνση αφορά την ξεχωριστή εξέταση ακραίων θερμοκρασιακών και ρυπαντικών επεισοδίων. Η σύγκριση ημερών καύσωνα με ημέρες συνήθων θερινών συνθηκών θα μπορούσε να δείξει εάν οι σχέσεις μεταβάλλονται όταν η θερμοκρασία υπερβαίνει συγκεκριμένα επίπεδα. Αντίστοιχα, η μελέτη ψυχρών επεισοδίων και θερμοκρασιακών αναστροφών θα ενίσχυε την κατανόηση της χειμερινής συσσώρευσης πρωτογενών ρύπων.

Για τα PM_{10} , ιδιαίτερα σημαντική είναι η συστηματική αναγνώριση ημερών που επηρεάζονται από μεταφορά αφρικανικής σκόνης, δασικές πυρκαγιές ή άλλες περιφερειακές πηγές. Η χωριστή κατηγοριοποίηση αυτών των ημερών και η πραγματοποίηση αναλύσεων ευαισθησίας με και χωρίς τα συγκεκριμένα επεισόδια θα επέτρεπαν τη διάκριση της τοπικής αστικής συνιστώσας από τη φυσική και περιφερειακή μεταφορά. Η επέκταση της μελέτης στα $PM_{2.5}$ θα παρείχε πρόσθετες πληροφορίες για το λεπτόκοκκο κλάσμα και τη σημασία του για τη δημόσια υγεία.

Η ενσωμάτωση δεδομένων κυκλοφορίας, κατανάλωσης καυσίμων, οικιακής θέρμανσης και λειτουργίας βιομηχανικών ή λιμενικών εγκαταστάσεων θα μπορούσε να βελτιώσει σημαντικά την ερμηνευτική ικανότητα των μοντέλων. Θα διευκόλυνε επίσης τη διάκριση

μεταξύ μεταβολών που συνδέονται κυρίως με τις εκπομπές και εκείνων που εμφανίζονται παράλληλα με τις μετεωρολογικές συνθήκες. Στο ίδιο πλαίσιο, θα ήταν χρήσιμη η σύγκριση εργάσιμων ημερών, Σαββατοκύριακων και επίσημων αργιών, ιδιαίτερα για το NO και το NO₂.

Η χωρική διάσταση της έρευνας θα μπορούσε να ενισχυθεί με περισσότερους σταθμούς, δορυφορικές παρατηρήσεις, μοντέλα ατμοσφαιρικής μεταφοράς και γεωγραφικά συστήματα πληροφοριών. Ο συνδυασμός επίγειων και τηλεπισκοπικών δεδομένων θα επέτρεπε πληρέστερη αποτύπωση της χωρικής κατανομής των ρύπων και καλύτερη κάλυψη περιοχών που δεν εκπροσωπούνται επαρκώς από το υφιστάμενο δίκτυο.

Επιστημονικό ενδιαφέρον θα παρουσίαζε επίσης η σύγκριση της Αθήνας με άλλες μεσογειακές μητροπολιτικές περιοχές. Μια τέτοια προσέγγιση θα επέτρεπε να διακριθούν τα ευρύτερα μεσογειακά χαρακτηριστικά από εκείνα που συνδέονται ειδικότερα με τη γεωμορφολογία, το κλίμα και τις ανθρωπογενείς δραστηριότητες του λεκανοπεδίου της Αθήνας.

Τέλος, η σύνδεση των περιβαλλοντικών δεδομένων με δείκτες δημόσιας υγείας θα μπορούσε να αναδείξει την κοινωνική σημασία της ταυτόχρονης θερμικής και ατμοσφαιρικής επιβάρυνσης. Η διερεύνηση νοσηλειών, επισκέψεων σε υπηρεσίες υγείας ή δεικτών θνησιμότητας κατά τη διάρκεια περιόδων υψηλής θερμοκρασίας και επιβαρυσμένης ποιότητας του αέρα θα συνέβαλλε στην πληρέστερη εκτίμηση του συνδυασμένου περιβαλλοντικού κινδύνου.

5.7 Τελικό συμπέρασμα

Η παρούσα διπλωματική εργασία διερεύνησε τη σχέση της θερμοκρασίας με πέντε βασικούς ατμοσφαιρικούς ρύπους στο λεκανοπέδιο της Αθήνας κατά την περίοδο 2016–2024, συνδυάζοντας χωρική, εποχική και βραχυχρόνια ανάλυση. Τα αποτελέσματα έδειξαν ότι η θερμοκρασία συνδέεται σε αρκετές περιπτώσεις με τις συγκεντρώσεις και τις ημερήσιες μεταβολές των ρύπων, χωρίς όμως η σχέση αυτή να είναι ενιαία, σταθερή ή εξίσου ισχυρή σε όλους τους σταθμούς και τις εποχές.

Το O₃ και τα PM₁₀ παρουσίασαν τις σαφέστερες θετικές σχέσεις, ενώ το NO και το NO₂ εμφάνισαν συχνότερα αρνητική κατεύθυνση. Το SO₂ χαρακτηρίστηκε από ασθενέστερη και

λιγότερο συνεπή συμπεριφορά. Οι διαφοροποιήσεις αυτές είναι συμβατές με τις διαφορετικές πηγές και τη φυσικοχημική συμπεριφορά των ρύπων και επιβεβαιώνουν ότι η θερμοκρασία δεν συνδέεται με ενιαίο τρόπο με το σύνολο της ατμοσφαιρικής ρύπανσης.

Κεντρικό στοιχείο της μελέτης αποτέλεσε η σύγκριση των ημερήσιων μέσων τιμών με τις μεταβολές μεταξύ πραγματικά διαδοχικών ημερών. Η πρώτη προσέγγιση αποτύπωσε τη γενικότερη συνδιακύμανση των μεταβλητών, στην οποία ενσωματώνεται και η εποχική τους διακύμανση, ενώ η δεύτερη ανέδειξε περισσότερο τη βραχυχρόνια δυναμική. Οι χαμηλές τιμές του R^2 , ακόμη και στις εντονότερες σχέσεις, έδειξαν ότι τα γραμμικά υποδείγματα απέδωσαν περιορισμένο μόνο μέρος της ημερήσιας μεταβλητότητας των ρύπων.

Σημαντική ήταν επίσης η χωρική και εποχική διαφοροποίηση των αποτελεσμάτων. Οι σχέσεις μεταβάλλονταν μεταξύ κυκλοφοριακών, αστικών, προαστιακών, περιαστικών και βιομηχανικά επηρεασμένων σταθμών, ενώ διαφορετικοί ρύποι παρουσίασαν τις εντονότερες συσχετίσεις τους σε διαφορετικές εποχές. Η εικόνα αυτή αναδεικνύει το λεκανοπέδιο της Αθήνας ως σύνθετο και ανομοιογενές ατμοσφαιρικό περιβάλλον, στο οποίο αλληλεπιδρούν τοπικές εκπομπές, μεταφορά αέριων μαζών, φωτοχημικές διεργασίες και συνθήκες διασποράς.

Το κεντρικό συμπέρασμα της εργασίας είναι ότι η θερμοκρασία αποτελεί μετρήσιμη, αλλά όχι επαρκή από μόνη της, παράμετρο για την κατανόηση της ποιότητας του αέρα. Δεν καθορίζει μονοσήμαντα τις συγκεντρώσεις των ρύπων, αλλά συνδέεται με το φυσικό και χημικό περιβάλλον μέσα στο οποίο αυτοί εκπέμπονται, μεταφέρονται, μετασχηματίζονται, συσσωρεύονται και απομακρύνονται.

Η μεθοδολογική αξία της εργασίας έγκειται στην ταυτόχρονη εξέταση πολλαπλών ρύπων, διαφορετικών τύπων σταθμών, εποχικών διαφοροποιήσεων και δύο συμπληρωματικών χρονικών προσεγγίσεων. Η προσέγγιση αυτή ανέδειξε ότι τα αποτελέσματα των ημερήσιων μέσων τιμών και των πρώτων διαφορών δεν είναι ισοδύναμα, αλλά αποτυπώνουν διαφορετικές όψεις της ίδιας σύνθετης ατμοσφαιρικής συμπεριφοράς.

Η ερμηνεία και η διαχείριση της ατμοσφαιρικής ρύπανσης απαιτούν, επομένως, πολυπαραγοντική, χωρικά εξειδικευμένη και εποχικά διακριτή προσέγγιση. Η συνδυασμένη αξιοποίηση μετεωρολογικών δεδομένων και πληροφοριών για τις εκπομπές, την κυκλοφορία και τις φυσικοχημικές διεργασίες μπορεί να συμβάλει στην ανάπτυξη πιο αξιόπιστων μοντέλων πρόβλεψης και περισσότερο στοχευμένων πολιτικών προστασίας της ποιότητας του αέρα και της δημόσιας υγείας στο λεκανοπέδιο της Αθήνας.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

ΕΛΛΗΝΙΚΗ

Ελληνική Δημοκρατία. (2011). ΦΕΚ 488B/30.3.11, ΚΥΑ ΗΠ 14122/549/Ε103 Μέτρα για τη βελτίωση της ποιότητας της ατμόσφαιρας, σε συμμόρφωση με τις διατάξεις της οδηγίας 2008/50/ΕΚ «για την ποιότητα του ατμοσφαιρικού αέρα και καθαρότερο αέρα για την Ευρώπη» του Ευρωπαϊκού Κοινοβουλίου και του Συμβουλίου της Ευρωπαϊκής Ένωσης της 21ης Μαΐου 2008». Εφημερίδα της Κυβερνήσεως, Αρ. Φύλλου 488, τεύχος Β, σ.7111-7162.

Ανακτήθηκε από

https://ypen.gov.gr/wpcontent/uploads/legacy/Files/Perivallon/Poiotita%20Atmosfairas/Nomothesia/FEK488B_KYA14122.pdf

Ελληνική Δημοκρατία. (2017). ΦΕΚ 1311B/13.4.17. ΚΥΑ.174505/607 Τροποποίηση των παραρτημάτων IV και V του άρθρου 8 της υπ' αριθμ. 22306/1075/2007 κοινής υπουργικής απόφασης (Β'920) και των παραρτημάτων I, III, VI και IX του άρθρου 30 της υπ' αριθμ. 14122/549/2011 κοινής υπουργικής απόφασης (Β'488), σε συμμόρφωση με την οδηγία 2015/1480/ΕΕ «για την τροποποίηση ορισμένων παραρτημάτων των οδηγιών του Ευρωπαϊκού Κοινοβουλίου και του Συμβουλίου 2004/107/ΕΚ και 2008/50/ΕΚ, οι οποίες ορίζουν τους κανόνες σχετικά με τις μεθόδους αναφοράς, την επικύρωση των δεδομένων και την τοποθεσία των σημείων δειγματοληψίας για την εκτίμηση της ποιότητας του ατμοσφαιρικού αέρα» της Ευρωπαϊκής Επιτροπής. Εφημερίδα της Κυβερνήσεως, Αρ. Φύλλου 1311, τεύχος Β, σ.11237-11242.

Ανακτήθηκε από

https://ypen.gov.gr/wp-content/uploads/legacy/Files/Perivallon/Poiotita%20Atmosfairas/Nomothesia/FEK1311B_KYA174505.pdf

Ευρωπαϊκή Ένωση. (2015). Οδηγία (ΕΕ) 2015/1480 της Επιτροπής της 28ης Αυγούστου 2015 για την τροποποίηση ορισμένων παραρτημάτων των οδηγιών του Ευρωπαϊκού Κοινοβουλίου και του Συμβουλίου 2004/107/ΕΚ και 2008/50/ΕΚ, οι οποίες ορίζουν τους κανόνες σχετικά με τις μεθόδους αναφοράς, την επικύρωση των δεδομένων και την τοποθεσία των σημείων δειγματοληψίας για την εκτίμηση της ποιότητας του ατμοσφαιρικού αέρα. Επίσημη Εφημερίδα της Ευρωπαϊκής Ένωσης, EL, L 226/4 – L226/11.

Ανακτήθηκε από <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EL/TXT/?uri=CELEX:32015L1480>

Ζέρβας, Ε., & Σέμπος, Ι. (2024). *Αέρια ρύπανση και αέρια αντιρρυπαντική τεχνολογία* [Μεταπτυχιακό εγχειρίδιο]. Κάλλιπος, Ανοικτές Ακαδημαϊκές Εκδόσεις. <https://dx.doi.org/10.57713/kallipos-1032>

Κατσαφάδος, Π., & Μαυροματίδης, Η. (2024). *Κλιματική αλλαγή* [Προπτυχιακό εγχειρίδιο]. Κάλλιπος, Ανοικτές Ακαδημαϊκές Εκδόσεις. <https://dx.doi.org/10.57713/kallipos-983>

Κούγκολος, Α. (2022). *Περιβαλλοντική Μηχανική Ρύπανση & Προστασία Περιβάλλοντος*. Θεσσαλονίκη: Εκδόσεις Τζιόλα.

Κουϊμτζή, Θ., Φυτιάνου, Κ. & Σαμαρά-Κωνσταντίνου, Κ. (1998). Χημεία περιβάλλοντος. Θεσσαλονίκη: University studio press.

Λαζαρίδης, Μ. (2009). *Ατμοσφαιρική ρύπανση: Ατμοσφαιρική χημεία, φυσικές διεργασίες και μοντελοποίηση*. Αθήνα: Εκδόσεις Τζιόλα.

Λαζαρίδης, Μ. (2023). *Ατμόσφαιρα και Κλίμα* [Μεταπτυχιακό εγχειρίδιο]. Κάλλιπος, Ανοικτές Ακαδημαϊκές Εκδόσεις. <https://dx.doi.org/10.57713/kallipos-194>

Μαλεφάκη, Χ., Ζαχαράκης, Γ., & Παναγιωτακόπουλος, Δ. (2023). *Στατιστική Ανάλυση Δεδομένων με τη χρήση της R*. [προπτυχιακό εγχειρίδιο]. Κάλλιπος, Ανοικτές Ακαδημαϊκές Εκδόσεις. <http://dx.doi.org/10.57713/kallipos321>

Μελάς, Δ., Μπάης, Α., & Μπαλής, Δ. (2015). *Ατμοσφαιρική τεχνολογία* [Προπτυχιακό εγχειρίδιο]. Κάλλιπος, Ανοικτές Ακαδημαϊκές Εκδόσεις. <https://dx.doi.org/10.57713/kallipos-782>

Μπαλτάς, Ε. (2013). *Εφαρμοσμένη μετεωρολογία*. Θεσσαλονίκη: Εκδόσεις Ζήτη.

Ρεμουντάκη, Ε. (2003a). Αέριοι ρύποι στην ατμόσφαιρα – Τροποσφαιρική χημεία. Στο Ι. Ζιωμάς & Ε. Ρεμουντάκη (Επιμ.), *Φυσικό Περιβάλλον και Ρύπανση* (σς. 135 - 149). Πάτρα: Ελληνικό Ανοικτό Πανεπιστήμιο.

Ρεμουντάκη, Ε. (2003b). Η ατμόσφαιρα: σύσταση και φυσικά χαρακτηριστικά. Στο Ι. Ζιωμάς & Ε. Ρεμουντάκη (Επιμ.), *Φυσικό Περιβάλλον και Ρύπανση* (σς. 95 - 125). Πάτρα: Ελληνικό Ανοικτό Πανεπιστήμιο.

Ρεμουντάκη, Ε. (2003c). Σωματίδια στην ατμόσφαιρα. Στο Ι. Ζιωμάς & Ε. Ρεμουντάκη (Επιμ.), *Φυσικό Περιβάλλον και Ρύπανση* (σς. 177 - 265). Πάτρα: Ελληνικό Ανοικτό Πανεπιστήμιο

Τσιλιγκιρίδης Γ. (2015) Πηγές Ρύπανσης». Θεσσαλονίκη. Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης Διαθέσιμο από τη δικτυακή διεύθυνση: <http://eclass.auth.gr/courses/OCRS284/>

Υπουργείο Περιβάλλοντος και Ενέργειας. (χ.χ.). *Εθνικό Δίκτυο Παρακολούθησης Ατμοσφαιρικής Ρύπανσης: Σταθμοί μέτρησης και χαρακτηριστικά λειτουργίας*. <https://ypen.gov.gr/perivallon/poiotita-tis-atmosfairas/dedomena-metriseon-atmosfairikis-rypansis/>

Φυτιανός, Κ. & Σαμαρά-Κωνσταντίνου, Σ. (2009). *Χημεία Περιβάλλοντος*. Θεσσαλονίκη: Εκδόσεις University Studio Press A.E.

Εθνική Μετεωρολογική Υπηρεσία (EMY). (χ.χ.). *Κλιματικά δεδομένα και μετεωρολογικοί σταθμοί*. <https://emy.gr/hnms-stations>

Εθνική Μετεωρολογική Υπηρεσία (EMY). (2026). *Μετεωρολογικά δεδομένα σταθμών Ελευσίνας, Ελληνικού και Τατοΐου για την περίοδο 2016-2024* [Αδημοσίευτα δεδομένα]. (μου δόθηκαν από την υπηρεσία έπειτα από επίσημο αίτημά μου στην πλατφόρμα της EMY στο gov)

Υπουργείο Περιβάλλοντος και Ενέργειας. (2025). *Ετήσια έκθεση ποιότητας της ατμόσφαιρας 2024*. ΥΠΕΝ.

ΞΕΝΟΓΛΩΣΣΗ

Al-Taai, S. H. H., & Mohammed al-Dulaimi, W. A. (2022). Air Pollution: A Study of Its Concept, Causes, Sources and Effects. *Asian Journal of Water, Environment and Pollution*, 19(1), 17–22. <https://doi.org/10.3233/ajw220003>

Arnfield, A. J. (2003). Two decades of urban climate research: a review of turbulence, exchanges of energy and water, and the urban heat island. *International Journal of Climatology*, 23(1), 1–26. <https://doi.org/10.1002/joc.859>

Arya, S. P. (1999). *Air Pollution Meteorology and Dispersion*. Oxford University Press.

Begou, P. (2023). *Application of AirQ+ Software in the Attica Region, Greece: The Hospitalizations and Work Days Lost Attributed to Air Pollutants* <https://doi.org/10.3390/environsciproc2023026036>

Bowler, D. E., Buyung-Ali, L., Knight, T. M., & Pullin, A. S. (2010). Urban greening to cool towns and cities: A systematic review of the empirical evidence. *Landscape and Urban Planning*, 97(3), 147–155. <https://doi.org/10.1016/j.landurbplan.2010.05.006>

Colette, A., Andersson, C., Baklanov, A., Bessagnet, B., Brandt, J., Christensen, J. H., Doherty, R., Engardt, M., Geels, C., Giannakopoulos, C., Hedegaard, G. B., Katragkou, E., Langner, J., Lei, H., Manders, A., Melas, D., Meleux, F., Rouil, L., Sofiev, M., Young, P. (2015). Is the ozone climate penalty robust in Europe? *Environmental Research Letters*, 10(8), 084015. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/10/8/084015>

Cramer, W., Guiot, J., Fader, M., Garrabou, J., Gattuso, J.-P., Iglesias, A., Lange, M. A., Lionello, P., Llasat, M. C., Paz, S., Peñuelas, J., Snoussi, M., Toreti, A., Tsimplis, M. N., & Xoplaki, E. (2018). Climate change and interconnected risks to sustainable development in the Mediterranean. *Nature Climate Change*, 8(11), 972–980. <https://doi.org/10.1038/s41558-018-0299-2>

Deligiorgi D., Philippopoulos K., Diamanti A. (2019). Statistical modeling of meteorological conditions and air pollution over Athens, Greece. Στο Global NEST International Conference on Environmental Science & Technology. CEST2019. Cosmos S.A. <https://doi.org/10.30955/gnc2019.00613>

Eleftheriadis, K., Gini, M. I., Diapouli, E., Vratolis, S., Vasilatou, V., Fetfatzis, P., & Manousakas, M. (2021). Aerosol microphysics and chemistry reveal the COVID19 lockdown impact on urban air quality. *Scientific Reports*, 11(1), 14477.
<https://doi.org/10.1038/S41598-021-93650-6>

European Environment Agency (EEA). (1999). *Air pollution by ozone in Europe in 1997 and summer 1998* (Topic Report No. 3/1999). European Environment Agency. ISBN 92-9167-123-1. <https://www.eea.europa.eu/en/analysis/publications/c1i92-9167-123-1>

European Environment Agency (EEA). (2016, June 29). *Temperature inversion traps pollution at ground level*.
<https://www.eea.europa.eu/en/analysis/maps-and-charts/temperature-inversion-traps-pollution-at?>

European Environment Agency (EEA). (2021, November 19). *Europe's changing climate hazards - an index-based interactive EEA report*.
<https://www.eea.europa.eu/en/analysis/publications/europes-changing-climate-hazards-an-index-based-interactive-eea-report?activeTab=784c2672-d0af-4c9e-9100-857d4088fc2a>

European Environment Agency (EEA). (2024, June 6). *Europe's air quality status 2024*.
<https://www.eea.europa.eu/publications/europes-air-quality-status-2024>

European Environment Agency (EEA). (2026a, May 8). *Air pollution*.
<https://www.eea.europa.eu/en/topics/in-depth/air-pollution>

European Environment Agency (EEA). (2026, June 30). *National Emission reductions Commitments (NEC) Directive emission inventory data, 1980-2023 ver 2.0*. [National Emission reductions Commitments \(NEC\) Directive emission inventory data](#)

European Environment Agency (EEA). (2024). *Air quality in Europe – 2024 report*. Luxembourg: Publications Office of the European Union.

European Environment Agency. (2025). *National emission reduction commitments directive emissions viewer*.
<https://www.eea.europa.eu/en/analysis/maps-and-charts/national-emission-reduction-commitments-directive-8>

European Parliament and Council of the European Union. (2024). *Directive (EU) 2024/2881 of the European Parliament and of the Council of 23 October 2024 on ambient air quality and cleaner air for Europe (recast)*. Official Journal of the European Union.
<https://eur-lex.europa.eu/eli/dir/2024/2881/oj/>

Fiore, A. M., Naik, V., & Leibensperger, E. M. (2015). Air quality and climate connections. *Journal of the Air & Waste Management Association*, 65(6), 645–685.
<https://doi.org/10.1080/10962247.2015.1040526>

Founda, D., & Santamouris, M. (2017). Synergies between Urban Heat Island and Heat Waves in Athens (Greece), during an extremely hot summer (2012). *Scientific Reports*, 7(1). <https://doi.org/10.1038/s41598-017-11407-6>

Founda, D., Katavoutas, G., Pierros, F., & Mihalopoulos, N. (2022). The Extreme Heat Wave of Summer 2021 in Athens (Greece): Cumulative Heat and Exposure to Heat Stress. *Sustainability*, 14(13), 7766. <https://doi.org/10.3390/su14137766>

Founda, D., Varotsos, K. V., Pierros, F., & Giannakopoulos, C. (2019). Observed and projected shifts in hot extremes' season in the Eastern Mediterranean. *Global and Planetary Change*, 175, 190–200. <https://doi.org/10.1016/j.gloplacha.2019.02.012>

Grange, S. K., Grange, S. K., Lee, J. D., Drysdale, W., Lewis, A. C., Hueglin, C., Emmenegger, L., & Carslaw, D. C. (2021). COVID-19 lockdowns highlight a risk of increasing ozone pollution in European urban areas. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 21(5), 4169–4185. <https://doi.org/10.5194/ACP-21-4169-2021>

Granier, C., Liousse, C., McDonald, B., Middleton, P. (2023). Anthropogenic Emissions Inventories of Air Pollutants. In: Akimoto, H., Tanimoto, H. (eds) *Handbook of Air Quality and Climate Change*. Springer, Singapore. https://doi.org/10.1007/978-981-15-2760-9_5

Grivas, G., Athanasopoulou, E., Kakouri, A., Bailey, J., Liakakou, E., Stavroulas, I., Kalkavouras, P., Bougiatioti, A., Kaskaoutis, D. G., Ramonet, M., Mihalopoulos, N., & Gerasopoulos, E. (2020). Integrating in situ Measurements and City Scale Modelling to Assess the COVID–19 Lockdown Effects on Emissions and Air Quality in Athens, Greece. *Atmosphere*, 11(11), 1174. <https://doi.org/10.3390/ATMOS11111174>

Hallquist, M., Wenger, J. C., Baltensperger, U., Rudich, Y., Simpson, D., Claeys, M., Dommen, J., Donahue, N. M., George, C., Goldstein, A. H., Hamilton, J. F., Herrmann, H., Hoffmann, T., Iinuma, Y., Jang, M., Jenkin, M. E., Jimenez, J. L., Kiendler-Scharr, A., Maenhaut, W., ... Wildt, J. (2009). *The formation, properties and impact of secondary organic aerosol: Current and emerging issues*. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 9(14), 5155–5236. <https://doi.org/10.5194/acp-9-5155-2009>

Ikram, M., Yan, Z., Liu, Y., & Qu, W. (2015). Seasonal effects of temperature fluctuations on air quality and respiratory disease: a study in Beijing. *Natural Hazards*, 79(2), 833–853. <https://doi.org/10.1007/S11069-015-1879-3>

Iliadis, L., Anezakis, V.D., Demertzis, K., Spartalis, S. (2018). Hybrid Soft Computing for Atmospheric Pollution-Climate Change Data Mining. In: Thanh Nguyen, N., Kowalczyk, R. (eds) *Transactions on Computational Collective Intelligence XXX. Lecture Notes in Computer Science()*, vol 11120. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-319-99810-7_8

Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). (2023). *Climate Change 2023: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Geneva: IPCC.

IPCC. (2023). *Climate Change 2023: Synthesis Report*.

Jacob, D. J., & Winner, D. A. (2009). Effect of climate change on air quality. *Atmospheric Environment*, 43(1), 51–63.

<https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2008.09.051>

Kalabokas, P., Stavraka, T., Kapsomenakis, J., Poupkou, A., & Zerefos, C. (2023). *The Evolution of the Seasonal Variation and the Summer Diurnal Variation of Primary and Secondary Photochemical Air Pollution in Athens*.

<https://doi.org/10.3390/environsciproc2023026122>

Kaskaoutis, D. G., Grivas, G., Liakakou, E., Kalivitis, N., Kouvarakis, G., Stavroulos, I., Kalkavouras, P., Zarnpas, P., Dumka, U. C., Gerasopoulos, E., & Mihalopoulos, N.

(2021). Assessment of the COVID-19 Lockdown Effects on Spectral Aerosol Scattering and Absorption Properties in Athens, Greece. *Atmosphere*, 12(2), 231.

<https://doi.org/10.3390/ATMOS12020231>

Katsoulis, B. D., & Kassomenos, P. A. (2004). Assessment of the Air-Quality Over Urban Areas by Means of Biometeorological Indices. The Case of Athens, Greece. *Environmental Technology*, 25(11), 1293–1304. <https://doi.org/10.1080/09593332508618375>

Katsoulis, B. D., & Theoharatos, G. A. (1985). Indications of the Urban Heat Island in Athens, Greece. *Journal of Climate and Applied Meteorology*, 24(12), 1296–1302.

[https://doi.org/10.1175/1520-0450\(1985\)024<1296:iotuhi>2.0.co;2](https://doi.org/10.1175/1520-0450(1985)024<1296:iotuhi>2.0.co;2)

Kinney, P. L. (2018). Interactions of Climate Change, Air Pollution, and Human Health. *Current Environmental Health Reports*, 5(1), 179–186.

<https://doi.org/10.1007/S40572-018-0188-X>

Kong, D., Ning, G., Ning, G., Wang, S., Wang, S., Cong, J., Luo, M., Luo, M., Ni, X., & Ma, M. (2021). Clustering diurnal cycles of day-to-day temperature change to understand their impacts on air quality forecasting in mountain-basin areas. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 21(19), 14493–14505. <https://doi.org/10.5194/ACP-21-14493-2021>

Koukouli, M.-E., Skoulidou, I., Karavias, A., Parcharidis, I., Balis, D., Manders, A., Segers, A., Eskes, H., & van Geffen, J. (2021). Sudden changes in nitrogen dioxide emissions over Greece due to lockdown after the outbreak of COVID-19. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 21(3), 1759–1774. <https://doi.org/10.5194/ACP-21-1759-2021>

Mavrakou, T., Philippopoulos, K., & Deligiorgi, D. (2012). The impact of sea breeze under different synoptic patterns on air pollution within Athens basin. *Science of The Total Environment*, 433, 31–43. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2012.06.011>

Mavroidis, I., & Ilia, M. (2012). Trends of NO_x, NO₂ and O₃ concentrations at three different types of air quality monitoring stations in Athens, Greece. *Atmospheric Environment*, 63, 135–147. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2012.09.030>

Monks, P. S., Archibald, A. T., Colette, A., Cooper, O., Coyle, M., Derwent, R., Fowler, D., Granier, C., Law, K. S., Mills, G. E., Stevenson, D. S., Tarasova, O., Thouret, V., von Schneidmesser, E., Sommariva, R., Wild, O., & Williams, M. L. (2015). Tropospheric ozone and its precursors from the urban to the global scale from air quality to short-lived climate forcer. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 15(15), 8889–8973.

<https://doi.org/10.5194/acp-15-8889-2015>

Myriokefalitakis, S., Karl, M., Weiss, K., Karagiannis, D., Athanasopoulou, E., Kakouri, A., Bougiatioti, A., Liakakou, E., Stavroulas, I., Papangelis, G., Grivas, G., Paraskevopoulou, D., Speyer, O., Mihalopoulos, N., & Gerasopoulos, E. (2024). *Analysis of secondary inorganic aerosols over the Greater Area of Athens using the EPISODE-CityChem source dispersion and photochemistry model*.

<https://doi.org/10.5194/egusphere-2023-2798>

Ntourou, K., Fameli, K.-M., Moustris, K., Augoustinos, A., & Tsitsis, C. (2023). The Influence of Ozone Concentrations on Public Health over the Greater Athens Area, Greece. Στο 16th International Conference on Meteorology, Climatology and Atmospheric Physics—COMECAP 2023 (σελ. 107). MDPI. International Conference on Meteorology, Climatology and Atmospheric Physics._

<https://doi.org/10.3390/environsciproc2023026107>

Ntourou, K., Fameli, K.-M., Moustris, K., Manousakis, N., & Tsitsis, C. (2024). Trends of the Global Burden of Disease Linked to Ground-Level Ozone Pollution: A 30-Year Analysis for the Greater Athens Area, Greece. Στο *Atmosphere* (τ. 15, Issue 3, σελ. 380). MDPI AG.

<https://doi.org/10.3390/atmos15030380>

Oke, T. R. (1982). The energetic basis of the urban heat island. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 108(455), 1–24. <https://doi.org/10.1002/qj.49710845502>

Oke, T. R., Mills, G., Christen, A., & Voogt, J. A. (2017). *Urban Climates*

Palantzas, A., Zarogiannis, S. G., Hatzoglou, C., Gourgoulialis, K., & Rouka, E. (2024). Trends in years lived with disability due to air pollution-related chronic respiratory diseases and estimates of pulmonary rehabilitation needs in Greece and worldwide. *Pneumon*, 37(3), 1–6. <https://doi.org/10.18332/pnc/190697>

Polydoros, A., Mavrakou, T., & Cartalis, C. (χ.χ.). Development of an urban resilience indicator for Athens in the context of climate change. Στο Global NEST International Conference on Environmental Science & Technology. CEST2021. Cosmos S.A.

<https://doi.org/10.30955/gnc2021.00271>

Psistaki, K., Petrou, I., Paschalidou, A. K., & Kassomenos, P. (2023). *Temporal and Spatial Characteristics of the Economic Burden Related to Long-Term PM2.5 and O3 Exposure in Greece for the Period 2004–2019*.

<https://doi.org/10.3390/environsciproc2023026014>

- Putaud, J.-P., Pozzoli, L., Pisoni, E., Martins Dos Santos, S., Lagler, F., Lanzani, G., Dal Santo, U., & Colette, A. (2021). Impacts of the COVID-19 lockdown on air pollution at regional and urban background sites in northern Italy. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 21(10), 7597–7609. <https://doi.org/10.5194/ACP-21-7597-2021>
- Sailor, D. J. (2011). A review of methods for estimating anthropogenic heat and moisture emissions in the urban environment. *International Journal of Climatology*, 31(2), 189–199. <https://doi.org/10.1002/joc.2106>
- Santamouris, M. (2014). On the energy impact of urban heat island and global warming on buildings. *Energy and Buildings*, 82, 100–113. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2014.07.022>
- Santamouris, M. (2015). Analyzing the heat island magnitude and characteristics in one hundred Asian and Australian cities and regions. *Science of The Total Environment*, 512–513, 582–598. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2015.01.060>
- Santamouris, M. (2020). Recent progress on urban overheating and heat island research. Integrated assessment of the energy, environmental, vulnerability and health impact. Synergies with the global climate change. *Energy and Buildings*, 207, 109482. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2019.109482>
- Seinfeld, J. H., & Pandis, S. N. (2016). *Atmospheric Chemistry and Physics: From Air Pollution to Climate Change* (3rd ed.). Hoboken, NJ: Wiley.
- Sindelarova, K., Arellano, S., Ginoux, P., Granier, C., Lennartz, S.T., Simpson, D. (2023). Natural Emissions on Global Scale. In: Akimoto, H., Tanimoto, H. (eds) *Handbook of Air Quality and Climate Change*. Springer, Singapore. https://doi.org/10.1007/978-981-15-2760-9_7
- Sindosi, O. A., Katsoulis, B. D., & Bartzokas, A. (2003). An objective definition of air mass types affecting athens, greece; The corresponding atmospheric pressure patterns and air pollution levels. *Environmental Technology*, 24(8), 947–962. <https://doi.org/10.1080/09593330309385633>
- Theodosi, C., Tsagkaraki, M., Zarnpas, P., Grivas, G., Liakakou, E., Paraskevopoulou, D., Lianou, M., Gerasopoulos, E., & Mihalopoulos, N. (2018). Multi-year chemical composition of the fine-aerosol fraction in Athens, Greece, with emphasis on the contribution of residential heating in wintertime. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 18(19), 14371–14391. <https://doi.org/10.5194/ACP-18-14371-2018>
- Tomczyk, A. M., & Katragkou, E. (2025). Occurrence of heatwaves in selected regions of Poland and Greece and the characteristics of their biometeorological conditions. *Quaestiones Geographicae*, 44(1), 107–116. <https://doi.org/10.14746/quageo-2025-0007>
- U.S. Environmental Protection Agency (EPA). (2008). *Urban heat island basics*. In *Reducing urban heat islands: Compendium of strategies* (Draft). U.S. Environmental Protection Agency. <https://www.epa.gov/heat-islands/heat-island-compendium>

van der Schriek, T., Varotsos, K. V., Giannakopoulos, C., & Founda, D. (2020). Projected Future Temporal Trends of Two Different Urban Heat Islands in Athens (Greece) under Three Climate Change Scenarios: A Statistical Approach. *Atmosphere*, 11(6), 637. <https://doi.org/10.3390/atmos11060637>

Wilks, D. S. (2019). *Statistical Methods in the Atmospheric Sciences* (4th ed.). Elsevier.

World Health Organization. (2021). *WHO global air quality guidelines: Particulate matter (PM_{2.5} and PM₁₀), ozone, nitrogen dioxide, sulfur dioxide and carbon monoxide*. Geneva: WHO.

Υπεύθυνη Δήλωση Συγγραφέα:

Δηλώνω ρητά ότι, σύμφωνα με το άρθρο 8 του Ν.1599/1986, η παρούσα εργασία αποτελεί αποκλειστικά προϊόν προσωπικής μου εργασίας, δεν προσβάλλει κάθε μορφής δικαιώματα διανοητικής ιδιοκτησίας, προσωπικότητας και προσωπικών δεδομένων τρίτων, δεν περιέχει έργα/εισφορές τρίτων για τα οποία απαιτείται άδεια των δημιουργών/δικαιούχων και δεν είναι προϊόν μερικής ή ολικής αντιγραφής, οι πηγές δε που χρησιμοποιήθηκαν περιορίζονται στις βιβλιογραφικές αναφορές και μόνον και πληρούν τους κανόνες της επιστημονικής παράθεσης.